

【産業競争力懇談会 2022年度 プロジェクト 最終報告】

【超電導で拓くカーボンニュートラル社会】

～Appendix～

2023年2月9日

産業競争力懇談会 **COCN**

APPENDIX-1 広域再エネ連系構想

1) 広域再エネ連系構想概念

2050年のカーボンニュートラル社会の実現のためには再生可能エネルギーの大量の導入が不可欠となっている。国内再生可能エネルギーは偏在しておりこれを活用するためには、電力系統網を利用して国内に広く行き届かせることが必要となる。本プロジェクトは、超電導の特性を活用することにより、国内変動性再生可能エネルギーを活用しながら、これまでに構築されてきた電力系統を発展させたレジリエントな次世代エネルギーシステムを提案する。超電導同期発電機の利用により広域電力連系を可能とし、広域連系による電力需給バランスの平準化と液体水素をエネルギーバッファとし長期間（季節間）のエネルギー貯蔵をも可能とするものである。

2050年のカーボンニュートラルを実現するためには再生可能エネルギーの大量の導入が必須となるが、太陽光や風力など由来の電力はインバータを介して電力系統に接続されることになる。これまで系統の安定化に寄与してきた同期発電機とは異なりインバータ電源は慣性力・同期化力を供給しないため、これらの大量の投入により系統の不安定化が指摘されており、同期安定性を維持するためにはこれまでと同様に慣性力・同期化力を維持・導入することが必要となる[1]。

それに対し半導体電力素子を用いた模擬的な慣性力・同期化力を出力する仮想同期発電機(VSG)が検討されている[2]。VSGによって従来の同期発電機と同様に慣性力・同期化力を供給することは可能であるが、圧倒的に異なるのは事故時に同期発電機のように大量の短絡電流を供給できないことである。半導体で構成されるVSGは過渡耐量が小さく定格の120%程度の電流しか供給できず、短絡事故が起こった場合に事故の検出が難しいとされる。一方、従来の同期発電機は定格の10倍もの短絡電流を供給することができる[3]。そのため将来においても系統にはある一定量の同期発電機が必要であると考えられる。利点は後述するが、再生可能エネルギーを大量導入し広域連系する上でメリットがある超電導発電機を導入することを考える。

太陽光発電や風力発電は天候に依存してその発電量が大きく変化することから常時需給バランスを調整することが必要となる。発電電力が不足する場合には他の発電手段によって不足分を供給し、過剰な場合はエネルギーをなんらかのメディアに貯蔵または出力抑制などが必要となるが、広い領域にわたって系統連系をすることによって需給バランスの凹凸を均すことができる。また、再生可能エネルギーのポテンシャルは北海道、東北地方および九州地方に偏在しており、今後の再生可能エネルギー源の開発に伴い、さら多くの電力を大需要地である首都圏へ輸送する必要がある。したがって広域連系を合理的に実現することがカーボンニュートラル社会を実現するための鍵となる。

再生可能エネルギーの大量の導入と利用の観点から、電力広域的運営推進機関(OCCTO)では広域連系系統のマスタープランが検討されており[4]、そこには北海道から本州への連系線や九州から中国・四国地方への連携線の増強が狙上に上がっている。また、既存の系統において容量を増強することなしに接続容量を増やすための日本版コネクト&マネージが資源エネルギー庁で検討が行われている[5]。カーボンニュートラル社会実現のためには、系統の安定性を維持しながら大量の変動性再生可能エネルギーを受け入れ可能としつつ、かつ、大きな送電容量を確保し広域連系できることが課題である。

この課題に対して超電導同期発電機は以下の理由により非常にマッチしたものであり、また、超電導による低損失化による効率改善（低炭素化）と相まって、カーボンニュートラル社会実現のためのキーコンポーネントの一つとして検討なされるべきものとする。超電導同期発電機を導入した場合には同期発電機として慣性力・同期化力を持ち、また、従来の同期発電機よりも内部インピーダンス（同期リアクタンス）が低いことから、送電距離および送電電力量を大きくすることができるとともに、同期化力が大きくなることから同期安定性が改善される。系統内の発電機の一部を超電導化することにより送電電力量が増加することが系統シミュレーションによって示されており[6]、適切に超電導発電機を系統に導入することによって送電ケーブルの変更なしに系統の運用容量を改善することができる。また、同期発電機を超電導化することによって0.5%程度の効率改善が見込まれるため低炭素化にも寄与する。

広域連系によって需給バランスの凹凸をいくらかは均すことができても今後大量導入される再生可能エネルギーに対しては、現在電力需給バランス調整を担っている火力発電、揚水発電に相当する機能が系統には必要となる。後述のように主に海外輸入水素を燃料とする火力発電所に相当する発電所が港湾地区に配備され、揚水発電所に相当する発電所が国内再生可能エネルギー集約基地として配置される。

広域再エネ連系構想においては水素を電力貯蔵メディアとしたエネルギーシステムとする。エネルギー貯蔵量としては1日の余剰電力を吸収するものではなく少なくとも週単位もしくは季節間のエネルギー貯蔵を想定する。エネルギー安全保障の観点からも長期にわたるエネルギー季節間貯蔵が重要である。このように長期間のエネルギー貯蔵を想定する場合には電力を転換した水素ガスの容積が大きくなるため液化して貯蔵する。

余剰再生可能エネルギーを液体水素に変えて貯蔵しておき電力需要に応じて超電導同期発電機を介して系統に電力を供給する電源設備を超電導再エネフロー制御システム(仮称)(Renewable Energy Flow Control System by using a Superconducting Apparatus)と呼ぶことにする。これは揚水発電のように電力需給に合わせて電力を供給・貯蔵する仕組みであり、さらに長期的な(季節間)エネルギー貯蔵をも担う。また、超電導同期発電によってインピーダンス変換して基幹系統に再エネ源を接続するゲートウェイとしての役割を果たし系統の安定化を実現する。

図 A1-1 に経済産業省資源エネルギーの再生可能エネルギー大量導入・次世代ネットワーク小委員会(第48回)の資料抜粋を示す。ここには系統連系強化のためのマスタープラン策定のための長期展望(案)が示されている。再生可能エネルギーのポテンシャルのある北海道、東北および九州地方から電力大需要地へ向けての系統の増強が想定されている。超電導再エネフロー制御システム(仮称)は、超電導同期発電機の内部インピーダンス(同期リアクタンス)の低さによって長距離の送電を可能とするものなので、なるべく再エネ発生地点に近くまた需要地から遠いところに配置することが効果が高い。また、同期発電機によってもたらされる慣性力・同期化力は直流連系によって断ち切られてしまうので、超電導再エネフロー制御システムは直流連系線の下流側(再エネ→需要地の流れの下流側)に配置されるのが望ましく、北海道と本州を結ぶ海底直流送電の揚陸点や九州-中国もしくは九州-四国の連系線の需要地側が候補地となる。超電導同期発電機導入による効果の定量化については今後の検討課題とする。

(参考) マスタープランの策定

第47回 再エネ大量導入小委（2022年12月6日）資料1（一部修正）

- 再エネ大量導入とレジリエンス強化のため、我が国の電力ネットワークを次世代化していく必要がある。そのため、電力広域機関において、2050年カーボンニュートラルも見据えた、広域連系システムのマスタープランを検討中であり、2022年度中に策定予定。
- 一部系統については既に検討を開始しており、今後、マスタープランで示された将来的な複数の増強方策も踏まえ、個別の系統整備計画について検討を進める。

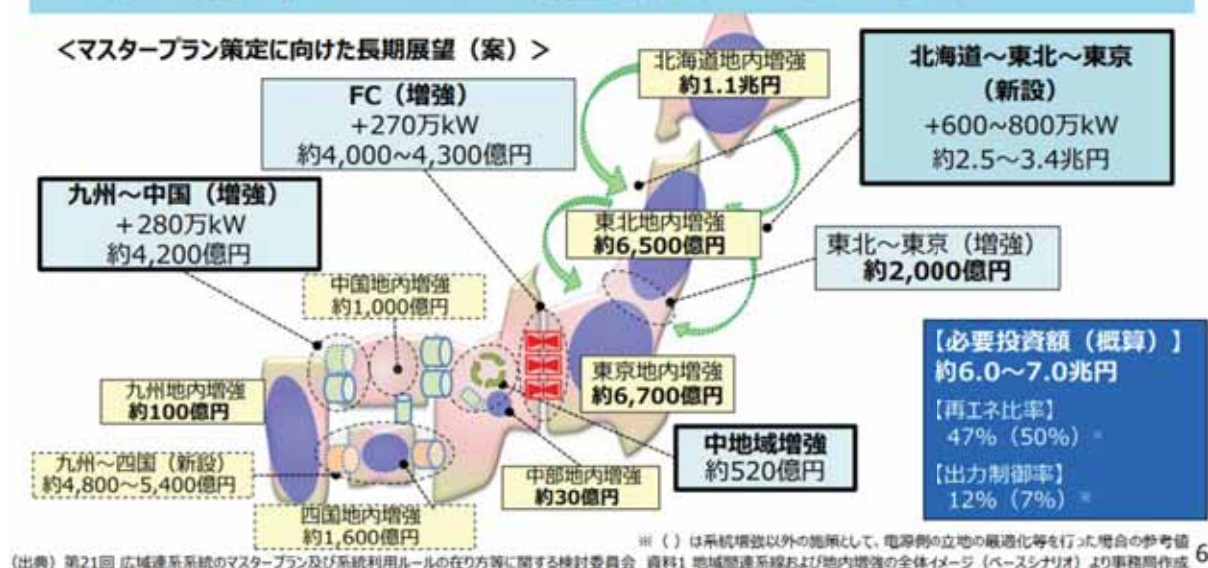


図 A1-1 （出典）経済産業省資源エネルギー庁総合エネルギー調査会 省エネルギー・エネルギー分科会／電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代ネットワーク小委員会（第48回）資料1「電力ネットワークの次世代化」（2022年12月27日）より抜粋

季節間エネルギー貯蔵を想定し水素は液化することとするが、ストレージの体積抑制ばかりではなく超電導同期発電機の運用におけるレジリエンスを高める効果がある。これまでに様々な超電導電力機器の開発が行なわれてきたが現在普及には至っていない。これは単独で超電導発電機を導入する場合には超電導発電機を冷却するための設備およびコストが発生すること（いわゆる冷却ペナルティ）と、超電導そのもののクエンチ（常電導転移）のリスクおよび極低温という特殊な環境下でのみ超電導にはならないため事故が起こった場合（例えば冷却装置故障、冷却系電源喪失等）には運転不能になる、再冷却に時間を要するなど運用上のリスクが大きいことによる。高温超電導体を比熱の大きな液体水素温度領域での運転することにより耐クエンチ性は桁違いに改善され、また、季節間貯蔵を想定した（たとえば100日分の）の液体水素が発電機近傍に貯蔵されていれば冷却ペナルティおよび運用上のリスクは大幅に低減されることとなる。

2) 超電導同期発電機によってもたらされる効果

超電導同期発電機によってもたらされる効果は、超電導同期発電機の内部インピーダンス（同期リアクタンス）の低さによって系統の運用容量が改善され、また、長距離の送電が可能となることである。効果の定量化については系統シミュレーションを用いた詳細な検討が必要であり、これについては今後の検討課題とするが簡単な式、モデルにてその改善効果を説明する。

同期化力の改善

同期発電機の同期化力は電機子の誘導起電力を E とし無限大母線の電圧を V_N 、発電機の同期リアクタンスを X_s 、線路のリアクタンスを X_l 、電機子の起電力と無限大母線電圧との電気角を δ_N とすると同期化力 S_y は

$$S_y = \frac{|E||V_N|}{X_s + X_l} \cos \delta_N \quad (1)$$

で与えられる。同期化力は分母のリアクタンスを小さくすると大きくなるのが分かる。系統容量は系統の同期安定性によっても制約されているが、発電機の同期リアクタンスを小さくすることによって同期化力が大きくなり同期安定性は改善され系統容量の増加が期待される。

送電距離が延びる効果

発電機超電導化による送電可能電力の増大効果（≒送電線の長さの延長効果）について概算する。詳細な評価は、電力系統を詳細にモデル化したシミュレーション評価が必要であるが、ここでは下記の前提のもとに簡易的に評価する。

・ 発電機、負荷、送電線のみで構成する簡易的な系統（1機無限大モデル）を対象とする（図 A1-2）

・ 以下の前提を置く

発電機内部起電力(E)と電力系統側(V_{inf})は変化しない

送電線の抵抗分、静電容量は無視する

・ 送電電力(有効電力)とインピーダンスの式から送電可能電力を推定する。

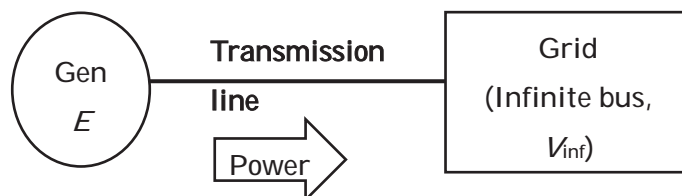


図 A1-2 対象系統

対象モデルにおいて、発電機から電力系統へ流れる有効電力(P)は、下式で表すことができる。

$$P = \frac{EV_{inf}}{X} \sin \theta \quad (2)$$

ここで、リアクタンス (X) は下式で計算できる。

$$X = X_d + X_{trans} + X_{line} \quad (3)$$

ここで、 X_d は発電機内部リアクタンス、 X_{trans} は昇圧変圧器のリアクタンス、 X_{line} は送電線のリアクタンスである。福島-東京間 (新福島変電所—新古河変電所) を想定し、発電機の内部インピーダンス、変圧器、送電線のインピーダンスは以下と仮定する。

(1000MVA ベースで計算)

$$X_d = 1.1 \text{ p.u. (電気設備技術計算ハンドブックより)}$$

$$X_{line} = 0.20 \text{ p.u. (東電 PG, 東北電力送配電の公開値より福島幹線の値を合算。180km)}$$

$$X_{trans} = 0.3 \text{ p.u. (= 0.15x2)}$$

(20kV から 500kV まで 2 段で昇圧と仮定。値は電気設備技術計算ハンドブックより。)

$$X = X_d + X_{trans} + X_{line} = 1.6 \text{ p.u} \quad (4)$$

式 (2) より同量の有効電力を送電する場合、その限界距離は X に反比例する。送電線のインピーダンスはその長さに比例するので、インピーダンスの削減効果が、送電距離の延びに相当する。超電導化による発電機内部リアクタンスの削減効果が $1/3$ とすると、内部リアクタンスの削減量は下記。

$$\text{内部リアクタンスの削減量} = 1.1 * \frac{2}{3} \text{ p.u.} = 0.73 \text{ p.u.}$$

今回想定した 500 kV 系統の 1km 辺りのインピーダンスは下記。

$$\frac{0.2 \text{ p.u.}}{180 \text{ km}} = 1.1 \times 10^{-3} \text{ p.u./km}$$

内部リアクタンスの削減効果を距離に換算すると

$$0.73 \text{ p.u.} \div \left(1.1 \times 10^{-3} \frac{\text{p.u.}}{\text{km}} \right) = 663.6 \approx 700 \text{ (km)}$$

よって約 700km 相当の延長効果 (あるいは送電可能な距離を約 4 倍延長する効果) がある。

また同じ送電線距離で、最大の送電可能な有効電力 (送電可能電力) の増大効果として表現する。超電導機化で内部リアクタンスが $1/3$ になった場合、 X は下記となる。

$$X_2 = \frac{X_d}{3} + X_{trans} + X_{line} = 0.87 \text{ p.u}$$

式 (2) で理論的に送電できる最大の有効電力は $\sin\theta = 1$ の時に実現されるため、超電導化に伴う送電可能電力の増加分は、リアクタンスの比率で計算することができる。

$$\frac{P_2^{max}}{P^{max}} = \frac{\frac{EV_{inf}}{X_2}}{\frac{EV_{inf}}{X}} = \frac{X}{X_2} = \frac{1.60}{0.87} = 1.84$$

よって、理論上の送電可能電力は約 80% 程度向上できる可能性がある。

本評価は簡易的であり実際の送電可能電力は種々の安定度や、送変電機器の物理的制約 (≒送電

電流による発熱による制約等)により制約される。このため精確な送電可能距離の延長効果は、種々の安定度のシミュレーションと、物理的制約の評価が必要である。

ここでは有効電力に関してのみ議論したが無効電力においても同様にインピーダンスを低減により送電可能距離を延ばすことが可能となる。系統の周波数安定度、電圧安定度を維持するためにはそれぞれ有効電力、無効電力を発電機で供給・吸収することとなるが、この超電導発電機による送電可能距離を延ばす効果は系統安定度制御領域を拡げることとなるから再エネ広域連系を実現する上で有効である。

系統容量の改善

超電導同期発電機を導入することによって系統の安定性が改善されることから系統容量の拡大が期待される。一般論としてこの効果を定量化することは困難であるが、系統シミュレーションによって超電導発電機の導入による系統容量の増加効果が示されている[6]。5台の発電機が無量大母線にぶら下がったシミュレーションにおいて、5台のうち1台の発電機を超電導発電機に置き換えた場合、(適切な場所の発電機を超電導発電機にリプレースすると)無量大母線を通じて供給される電力量が2倍に向上している。系統内の配備された既存発電機を部分的に超電導発電機に置き換えることにより、送電設備の増強なしに系統容量を増強することが可能であることを示唆している。超電導発電機の導入効果の定量化や最適導入量・最適導入地点の決定には、実系統を模擬した詳細な系統シミュレーションが必要であり今後の課題とする。

3) 超電導再エネフロー制御システム(仮称)の検討

3-1) 基本構成

再生可能エネルギーの大量導入のためには系統には慣性力・同期化力およびエネルギーストレージが必要となる。慣性力・同期化力の供給手段としては前述の通り同期発電機、仮想同期発電機(VSG)があり、エネルギー貯蔵媒体として水素ガス、蓄電池を考えるとその組み合わせは表A1-1のようになる。広域再エネ連系構想を実現させるためには、超電導同期発電機による長距離送電、同期安定性の改善が必要要件であり、また、季節間エネルギー貯蔵を想定して液体水素を利用することになることから、超電導再エネフロー制御システム(仮称)の構成としてはNo.1もしくは2となる。両者とも超電導同期発電機を備え液体水素をエネルギーストレージとしているが発電するための動力を得るところが異なっており、前者が水素を燃焼してタービンを回して得られた機械動力で発電機で電力に変換するのに対し、後者は燃料電池で発電しその電力でモータを回して得られた機械動力で発電機で電力に変換する(M-Gセット)。どちらの方式においても開発課題、たとえば水素燃焼タービン発電機では水素酸素燃焼器、燃料電池では触媒使用量の低減や長寿命化などがあり、また実用化のためにはコスト低減やシステム全体として効率を改善していく必要がある。超電導同期発電機的设计(回転速度)はそれを回す動力に依存すると考えられ(水素燃焼タービンなら2極機、M-Gセットなら多極化も考えられる)、水素ガスからエネルギーを生み出す部分の開発状況を注視しながら超電導同期機の開発を行う必要がある。

いずれの場合にも、系統への電力供給インターフェイスとして超電導同期発電機を備えており、超電導同期発電機の内部インピーダンス(同期リアクタンス)が低いこと、および大きな短絡電流を供給可能で

あることが、大量の再エネを導入した広域連系を実現するためのキーとなっている。

表 A1-1 慣性力・同期化力提供手段とエネルギー貯蔵媒体の組み合わせ

No.	慣性力・同期化力	エネルギー貯蔵媒体	構成要素
1	同期発電機	水素ガス (液体水素)	充電：電力を水電解装置にて水素ガスに変えて、さらに液化機で液化して液体水素として貯蔵する。 放電：液体水素を気化させ水素を燃焼させてタービンを回して同期発電機によって発電・供給する。
2			充電：電力を水電解装置にて水素ガスに変えて、さらに液化機で液化して液体水素として貯蔵する。 放電：液体水素を気化させ燃料電池によってモータを駆動し同期発電機によって発電・供給する。 (M-G セット)
3		蓄電池	充電：電力を直流に変換し蓄電池に充電する。 放電：蓄電池でモータを駆動し同期発電機によって発電・供給する。 (M-G セット)
4	仮想同期発電機	水素ガス (液体水素)	充電：電力を水電解装置にて水素ガスに変えて、さらに液化機で液化して液体水素として貯蔵する。 発電：燃料電池で発電し電力変換器し供給する。
5		蓄電池	充電： 電力変換器＋蓄電池 発電： 電力変換器で変換する。

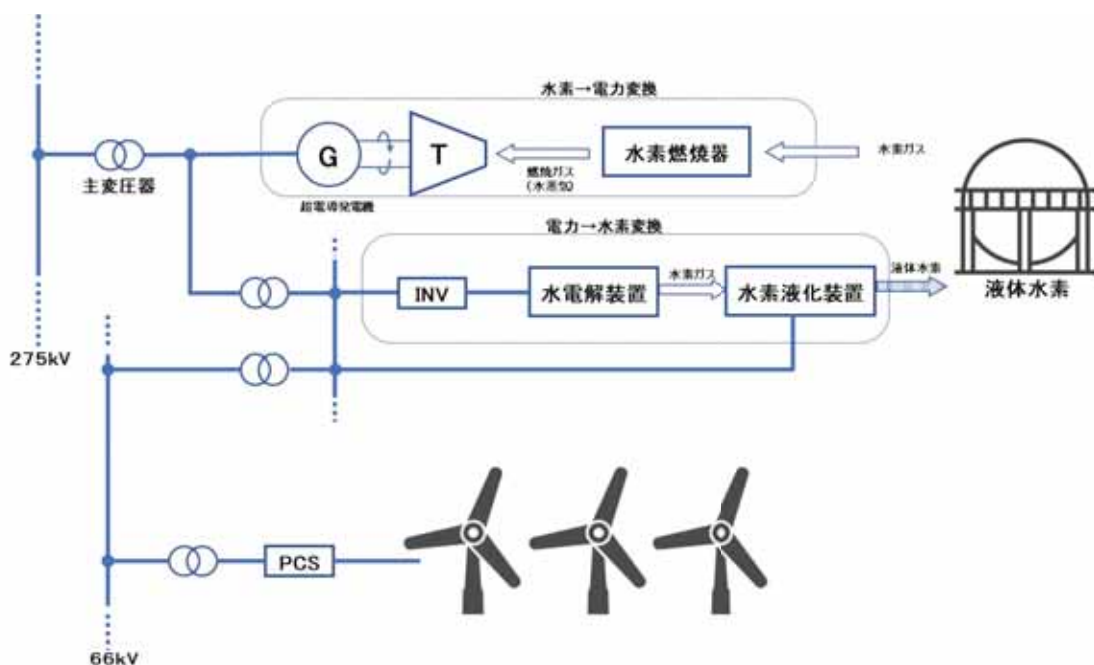


図 A1-4 超電導再エネフロー制御システム(仮称)の構成例のひとつ。水素燃焼ガスによってタービンを駆動し発電するもの。

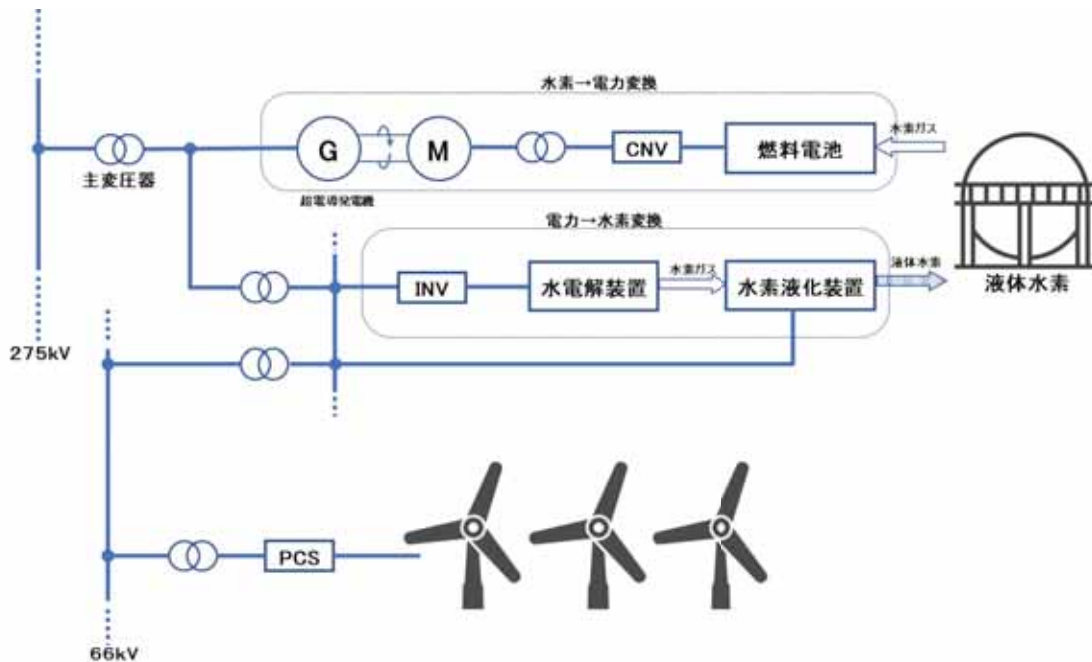


図 A1-5 超電導再エネフロー制御システム(仮称)の構成例のひとつ。燃料電池によってモータを駆動し発電するもの。

3-2) 液体水素+液体空気ハイブリッド発電システム

エネルギー貯蔵の媒体として液体水素を想定しているが、小規模なエネルギーストレージとして液体空気を使う方式 (LAES: Liquid Air Energy Storage) も検討されている。これは圧縮空気としてエネルギー貯蔵する代わりに液化によって空気の状態変化によってエネルギーを蓄積しておき、液化空気の蒸発による体積膨張を利用してタービンを回して発電を行うものである。液体空気によるエネルギー貯蔵は、水素のように化学エネルギーを燃焼によって取り出さないで本質的にエネルギー密度は低い貯蔵方法である。しかし、液体水素の沸点が 20K に対し液体空気の沸点は約 80K であり液化のために必要なエネルギーが小さく、燃焼器不要でタービンを回して簡単に発電が可能であることから、これを従来の汽力発電と組み合わせると高効率の発電システムを構築することが可能となる (LAES と冷熱をカスケード利用する考え方は、NEDO 報告書「2021 年度成果報告書戦略策定調査事業/水素社会の構築で必要になる革新的冷熱活用技術に関する調査」を参照)。

図 A1-6 に水素酸素燃焼複合サイクル発電と液化空気エネルギー貯蔵発電を組み合わせた発電システムの概略図を示す。水素酸素燃焼複合サイクル発電は従来のコンバインド発電サイクルとは異なり、ガスタービンサイクルとタービンサイクルが統合されたセミクロズドサイクルになっており、コンバインドサイクルに対して 5-10%程度熱効率が改善し約 70%の熱効率が得られる [7][8]。この発電サイクルにおいても蒸気タービン発電において復水器のところで冷却水に熱を捨てているが、この排熱を回収し液体空気を蒸発膨張させて仕事をさせることによって全体としての熱効率を改善することが可能となる。このハイブリッド構成では熱効率を改善するばかりで

はなく、汽力発電で必要となる冷却海水を不要とすることができ発電所立地条件の制約を緩和することができる。

このハイブリッドシステムでは、液体水素の冷熱は超電導同期発電機の冷却、水素酸素燃焼発電の酸素を得るための空気分離および LAES の冷熱源として利用され、エネルギーストレージとしての水素の液化が単にストレージ体積を低減するためでなく、それぞれの機能を実現するためにその冷熱が有効に活用される。

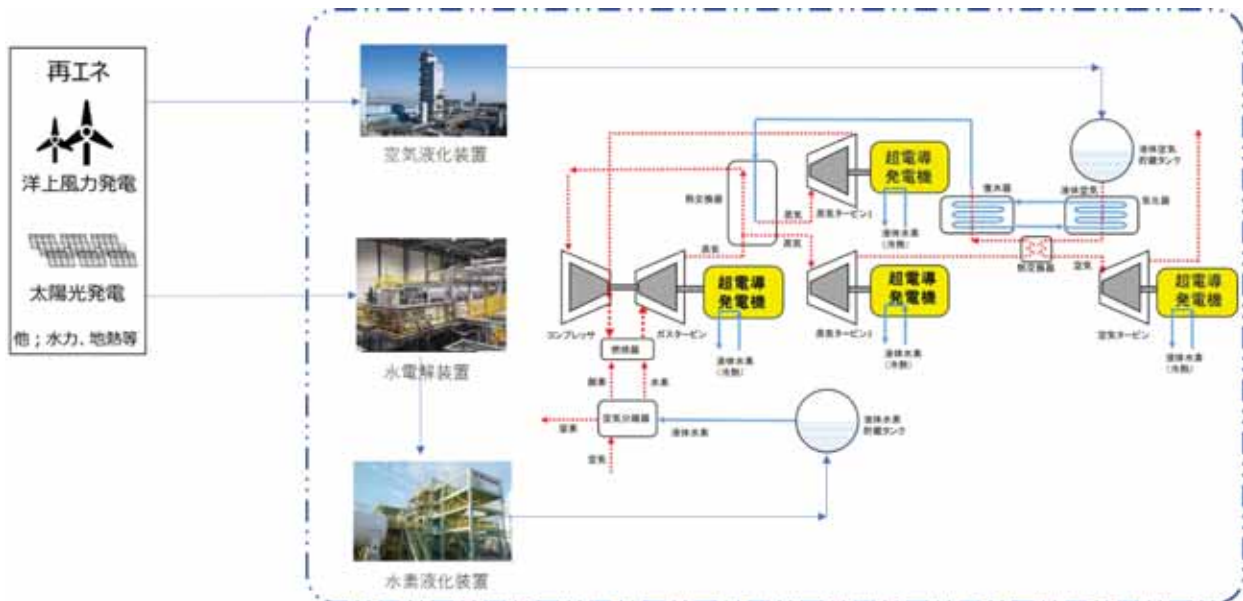


図 A1-6 水素酸素燃焼複合サイクルと液化空気エネルギー貯蔵発電を組み合わせた高効率発
3-3) エネルギー変換速度

余剰電力を液体水素に変換してエネルギー貯蔵を行う超電導再エネフロー制御システム(仮称)においては、余剰電力受け入れ速度(設備容量)と液体水素へ変換する速度の整合性が取れている必要がある。余剰電力は水電解装置によって水素ガスに変換され、さらに液化装置で液体水素に変換される。水電解における水素ガス製造速度と液化装置による液体水素製造速度が合致するように装置は構成されなければならない。受け入れ可能な余剰電力は液化速度から、単位時間あたりに液化に必要な電力とその水素を得るために水電解に投入する電力の和で概算することができる。ここで余剰電力を 1GW で受け入れる(毎秒 1GJ 分の液体水素が製造されるわけではない)場合の装置の規模感を見積もることとする。

現在の水電解装置の規模感としては、経産省および NEDO の技術実証事業で 2020 年より福島県浪江町で 10MW の水素製造装置を備えた福島水素エネルギー研究フィールドが立ち上げられている[9]。ここには旭化成株式会社によって開発された 10MW を基本モジュールとするアルカリ水電解システム[10]が設置されており、水電解モジュールを必要な台数並べることにより再生可能エネルギーの設備容量に応じた電力→水素ガス変換プラントを構成できる。

水素液化に関しては、現在、国内で水素液化を行っている岩谷産業株式会社では 5ton/day の液化能力を持つ液化機を 6 台稼働させていることから、5ton/day の液化能力を基準にエネルギー変換速度を考えることにする。水素の燃焼エネルギーは 143kJ/g である。5ton/day の液化能力では

57.9g/s の速度すなわち 1 秒あたり 8.28MJ のエネルギーに相当する液体水素が生成されることになり、液化装置のエネルギー変換速度は 8.28MW となる（ただし燃焼エネルギーに対して液体水素の潜熱、顕熱は十分に小さいため無視することにする）。水素ガスを液化するために水素ガスの燃焼エネルギーの 3 割を必要とすると仮定すれば液化のために消費した電力は 2.48MW となる。水電解の効率を仮に 80% と仮定すると毎秒 8.28MJ の水素を得るためには $8.28\text{MW}/0.8=10.38\text{MW}$ の電力を必要とすることになる。したがって 5ton/day の液化能力を持つ液化機に対しては合計 12.8MW の電力を変換して毎秒 57.9g (8.28MJ) の液体水素が得られたことになり、余剰再生可能受け入れ可能速度は 12.8MW となる。したがって、1GW の余剰電力を受け入れるためには 5ton/day の水素液化機が 78 台必要となる。川崎重工株式会社は 2020 年に国産初の 5ton/day の水素液化機を販売開始をしており、さらに液化能力を向上した 25ton/day の開発をすることが計画されている。水素液化機の高効率化と大容量化によって余剰電力を液体水素に変換する速度についてはボトルネックとはならないと考えられる。

3-4) 液体水素ストレージの見積もり

エネルギー変換に関わるプロセスの電力などについては考慮せず、単に液体水素または液体空気が有するエネルギーのみで容積を見積もる。太陽光・風力発電の発電量は天候に左右されることから数日から週単位でのエネルギーのバッファが必要となる。仮に設備容量 1GW に対して 24 時間分のエネルギーすなわち 24GWh、86.4TJ を貯蔵することと考え、これを等価液体水素体積に換算することとする。ただし、燃焼熱のみを考え潜熱や顕熱で保持されるエネルギーについては考えないこととする。水素の燃焼熱は 143kJ/g、 $10010\text{J}/\text{cm}^3$ であるので 86.4TJ の燃焼熱を得るのに必要な液体水素の体積は 8640m³ となるが、川崎重工株式会社では貯蔵容量 10000m³ の液体水素貯蔵タンクの基本設計を完了[11]しており現実的である。

液体水素ではなく液体空気で貯蔵する場合には LAES (Liquid Air Energy Storage) システムでは 333-552kJ/kg が期待される[12]ので液体空気の比重を 1 とすれば 157000-259000m³ もの体積を必要とすることになり、液体空気単独でエネルギー貯蔵することは現実的ではない。しかし、図 A1-6 のように水素-酸素燃焼複合サイクル発で海水に捨てられる 3 割の熱の一部を回収して LAES のエネルギー出力プロセスに利用することにし、8 割を液体水素、2 割を液体空気でエネルギー貯蔵するシステムを考えれば液体空気の体積は 30000-50000m³ 程度で済むこととなり、容積 10000m³ の LNG の貯蔵タンクが存在すること考えると現実的な数字となる。

仮に 1GW の設備容量に対して 24 時間分のエネルギー貯蔵するための物量感を見積もったが、季節間エネルギー貯蔵の場合、例えば 100 日間の貯蔵が必要の場合にはこの見積もりの 100 倍の容積が必要となる。長期貯蔵による液体水素のボイルオフによる蒸発については考慮していないが、大型液体水素貯蔵タンクではボイルオフレートは 1 日あたり 1%未満であるから 100 日分のストレージにおいて約 1 日分の液体水素が気化し、その気化した水素ガスを利用して発電が行われると考えれば全く問題がない。

参考文献：

- [1] “「再エネ主力電源化」に向けた技術的課題及びその対応策の検討について”，第 55 回調整力及び需給バランス評価等に関する委員会資料（2020 年 10 月 27 日）
- [2] https://www.iee.jp/pes/termb_116/
- [3] 佐藤義久 et. al., “再生可能エネルギー電源の電力系統接続可能容量に関する一考察”，Journal of JWEA
- [4] “マスタープラン策定に向けた長期展望について（連系線増強の方向性）”，電力広域的運営推進機関 第 18 回広域連系システムのマスタープランおよび系統利用ルールの在り方等に関刷り検討委員会資料(2022 年 6 月 23 日)
- [5]”日本版コネクト&マネージにおけるノンファーム型接続の取組“，第 43 回 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会／電力・ガス事業分科会電力・ガス基本政策小委員会 系統ワーキンググループ資料(2022 年 11 月 30 日)
- [6] Guohong Wu et. al.,” Enhancement on Available Transfer Capability of Multi-machine Power System by Introduction of Superconducting Generator “，電学論 B, 125 巻 10 号, 2005 年
- [7] 武埜浩太郎 et. el., “酸素水素燃焼発電サイクルのエクセルギー解析および性能解析”，Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 42, No. 5
- [8] 山下誠二 et. el., “水素酸素燃焼タービンのエクセルギー解析”，日本ガスタービン学会誌 Vol.45 No.3 2017.5
- [9] <https://www.meti.go.jp/press/2019/02/20200213001/20200213001.html>
- [10] <https://ak-green-solution.com/>
- [11]https://www.khi.co.jp/pressrelease/detail/20201224_1.html
- [12] Andrea Vecchi et. el., “Liquid air energy storage (LAES): A review on technology state-of-the-art, integration pathways and future perspectives”，Advances in Applied energy 3(2021)

APPENDIX-2 水素コンプレックス

1) 水素コンプレックスの概念

カーボンニュートラル実現へ向け、再生可能エネルギー及び水素エネルギーを普及させる上で必要な課題を緩和する一つの事業方策として水素コンプレックスを提案する。水素コンプレックスとは、超電導と液体水素を基軸とした産業の複合体のことを言う。複合企業体が協調しレジリエントなエネルギーシステムを形成しつつ、カーボンニュートラル実現へ向けて“超電導”が推進力となる概念である。

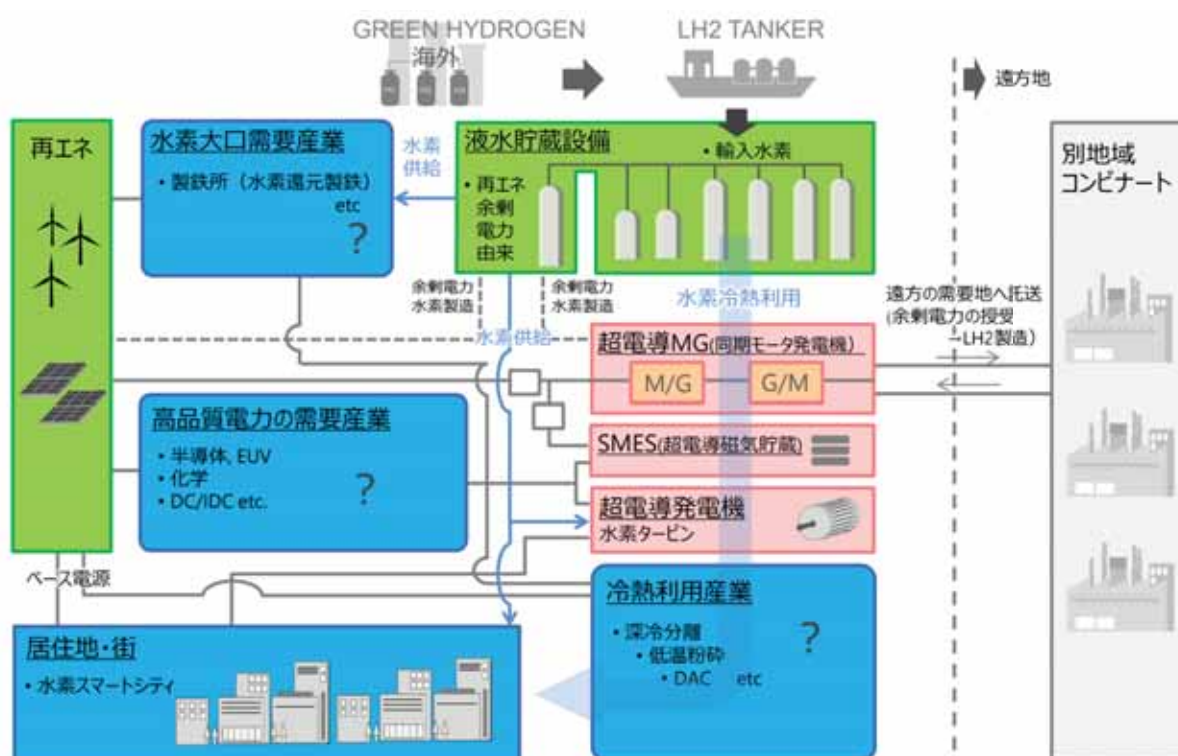


図 A2-1 水素コンプレックスの概念図

1) 水素コンプレックスの電源構成

水素コンプレックスでは、太陽光や風力等の再生可能エネルギーをベース電源とする。しかし、再生可能エネルギーの比率が上がれば、電源システムの安定性低下（同期化力や慣性力の低下）や、電力需給の時間的、空間的な偏りが問題となる。これを解決する手段として、グリーン或いはブルー水素を原料とした水素ガスタービン発電を出力調整として用いることが考えられる。水素ガスタービン発電機の導入により、コンプレックス内の系統に慣性力と同期化力を負荷し、系統安定性を担保する。

水素コンプレックスに導入する水素ガスタービン発電機の一部、或いは全てを超電導発電機とすれば、その低インピーダンスの効果で同期化力が向上する。同期化力はコンプレックス内の電源システムの安定性を向上させるため、再生可能エネルギーの出力調整としての超電導発電機の導入は相性が良い。また、超電導発電機は、再生可能エネルギーの別課題である電力需給の時間的偏

りを緩和することにも貢献する。超電導発電機は低インピーダンスの影響で無効電力の調整範囲が拡大するからである。例えば、夜間の系統が低負荷時の電圧上昇を抑制、制御範囲が拡大するという利点がある。これは、再生可能エネルギーの様な日間の供給変動が大きな電源と、日間の需要変動が大きい工業地域との組み合わせにおいて、超電導発電機の無効電力の調整範囲拡大というメリットが享受できる可能性がある。従って、再生可能エネルギーと超電導発電機の相性は良い。

また、超電導発電機の導入により発電効率が向上する。例えば、定格容量が 500MW 程度の発電機を考えた場合、その発電効率が 0.5%程度向上しただけであっても、年間で数億円規模の損失改善になり、収益向上に直結する。効率改善による収益向上分の一部を、液体水素製造費用、或いは輸入費用に割り当てる事業モデルを構築すれば、水素入手コストの抑制、すなわち超電導発電機の付加価値が水素普及の役割を担うとも言える。

超電導発電機の現行機と比較したデメリットは超電導状態を保持するために冷却設備・電力が必要となる点である。しかし、水素コンプレックス内においては、液体水素が潤沢に存在しているため、冷却コストは格段に下がる。或いは、その冷熱利用料を水素入手コストに反映させてさらに水素普及を促進するという事業モデルを考えることができる。以上は前述した方策②「エネルギーキャリアとしての水素を普及させる」につながる。

超電導発電機の導入により、再生可能エネルギーと水素発電を組み合わせた電源構成が成立すると、電力の環境価値、或いは非化石価値取引としての事業性が期待される。加えて、企業体はカーボンニュートラル実現へ向けた社会的責任を果たすことができる。近年は、RE100のように企業意識も変化も見られつつある。企業体が事業において消費する電力を再生可能エネルギー100%で賄う取り組みを通じてカーボンニュートラルに貢献しようとする姿勢である。また、企業体に対して気候変動に関する情報開示を促すTCFD(Task force on Climate-related Financial Disclosures)など企業体の環境変動に対する取り組みが社会的責任として認知されつつある。これらを鑑みても、カーボンニュートラル実現へ向けた企業体の関与、意識の変化は今後ますます促進されると考えられ、水素コンプレックスのようなカーボンニュートラル貢献地域への参入は、事業活動としても適切な動機を与えられられる。

2) 水素コンプレックスが助け合うエネルギーシステム

水素コンプレックスでは、再生可能エネルギーがベース電源となり、水素ガスタービンが出力調整の機能を果たす。この水素ガスタービン用に貯蔵する液体水素は、経済性を考慮すると現状は主に国外からの輸入に頼らざるを得ない。しかし、全ての水素を輸入に頼るのは、エネルギー安全保障上、現実的ではない。水素コンプレックス内の液体水素も一部、水電解等を用いて製造するのが良い。輸入と地域内製造をどのくらいの比率で運用するかは、今後の水電解等の効率化、低コスト化開発や事業性にもよる。ここで重要な点は、コンプレックスでの水素製造は再生可能エネルギーの余剰電力を用いることである。すなわち、余剰電力は廃棄するのではなく、蓄電するか液体水素という形態でエネルギー貯蔵することになる。

輸入含めて貯蔵すべき液体水素の量は、例えば、コンプレックスの電力が 1GW で成立し、それ

を 100 日間保持するために必要な液体水素の量として求めると以下となる。1GW は年間では 8760GWh に相当、これは約 31.6PJ のエネルギー量となる。仮に発電効率を 60% とすると、必要エネルギー量は 52.6PJ である。一方、水素ガスの発熱量は 12.8MJ/Nm³、液体水素は水素ガスの約 1/800 の体積であることを考慮すると、液体水素の発熱量は 10.2GJ/m³ と見積もられる。従って、52.6PJ のエネルギー量を得るために必要な液体水素量は 5.13 Mm³ となる。現状、世界最大級の液体水素の貯蔵タンクとして岩谷産業（株）の 11,200m³ の貯蔵タンクが知られるが、これを用いた場合でも約 460 基のタンクが必要となる。100 日分の液体水素量を貯蔵するにはこの 100/365 で約 130 基、貯蔵タンクの直径が 30m 程度あるとすると、タンクのみで概ね 1km 四方もの設置面積が必要な計算となる。そこで、コンプレックスが助け合うエネルギーシステムを導入し、この設置面積、すなわち液体水素の貯蔵量を低減させる方策を考える。

このコンプレックスが助け合うエネルギーシステムは、災害等の突発的不具合事象に対するレジリエンス性を高めるとともに、エネルギー安全保障も強化する。一つのコンプレックスでは再生可能エネルギーの余剰電力（或いは輸入水素）で液体水素を製造、貯蔵する一方で、水素貯蔵タンクの空容積によっては、余剰電力を他のコンプレックスに託送し、そこでの水素製造を行う。水素貯蔵タンクの液体水素残量が少ない場合（すなわち、水素貯蔵タンクの空容積が大きい場合）には、他のコンプレックスから託送されてきた電力により液体水素を製造、貯蔵する。これにより、水素貯蔵タンクの空容量を常に一定レベルに保つことができる。すなわち、貯蔵タンクの遊休期間が低減する。このような他のコンプレックスとの余剰電力の融通（シェアリング）においては、なるべく多くのコンプレックス間で行うことがレジリエンス性を高める。なぜならば、ある地域に置いて天候不順等で再生可能エネルギーの発電出力が低下した場合、それを補うことができる地域が増えるからである。従って、この余剰電力は可能な限り遠方まで託送できることが望ましい。この点において、超電導発電機の低インピーダンスの効果が非常に役立つ。発電機が低インピーダンスであることで電圧降下が抑制され、昇圧設備等の追加設置設備コストを抑制しつつ、電力の遠方託送が可能となるからである。言い換えれば、超電導発電機の低インピーダンスによりより多くの地域（仲間）と助け合うエネルギーシステムが構築できる可能性がある。また、低インピーダンスであることは、有効電力の託送能力を高めると言うこともできる。すなわち、送電限界容量が増加する。一般に、送配電網についての投資は必要最小限に抑えることが必要とされ、費用対効果或いは工事実現性の観点から増強が適切でないとは判断される場合には、増強工事を入れることは合理的ではない。そのため、既存の設備で如何に遠方、かつ有効に電力託送を可能とするか、が重要な視点となる。例えば、前述の 100 日間のエネルギーを保存するための液体水素の貯蔵量 5.13 Mm³ に対して、超電導発電機の低インピーダンスの効果で 10 地域のコンプレックス間で互いに助け合うエネルギーシステムが構築されれば、原理的には 5.13 Mm³ の 1/10 程度の貯蔵量で十分である。すなわち、貯蔵タンクの設置面積も 1/10 程度、約 100m 四方の設置面積で十分となり、現実的な値となると言える。

この助け合うエネルギーシステム内のコンプレックスにおいては、電力を託送する一方で、他コンプレックスからの電力を受け取り、それを水素製造に活用する必要がある。この場合、超電導モータージェネレーター（超電導 MG）の導入が組上に載る。モーターとジェネレーターの 2

つの回転機により慣性力は2倍、また超電導化による効率向上の効果も2倍になることが想定される。コンプレックス内の再生エネルギーの余剰電力は超電導 MG で遠方まで託送され、コンプレックスの外から受け取る電力は超電導 MG のモーターの動力となり、ジェネレーターで発電、液水素を製造、貯蔵する。MG の電力系統への導入については、電力中央研究所が推進する NEDO 事業「再生可能エネルギーの主力電源化に向けた次々世代電力ネットワーク安定化技術開発」が進められており、ここでの開発成果が期待される。また、この MG の超電導化に対する効果については、「我が国の電力システムの現状・将来展望と超電導技術への期待」(低温工学 56 巻 5 号 2021 年)でも述べられている。

このような助け合うエネルギーシステムは、コロナショックにより変化している企業意識、つまり多様で柔軟な働き方に対する意識変化に対しても訴求すると考えられる。今後、この傾向はさらに進むと考えられ、人口は都市部集中から地方へ分散していくことも考えられる。この場合、居住地は全国各地に小規模で点在することになる。例えば、内閣府の“選択する未来 2.0 中間報告(2020 年 7 月 1 日)”においては、「政令都市や中核市を中心に全国で 100 のスマートシティを形成し、多核連携の核としていく」ことも提案されている。その結果、発電場所から遠方を含む多くの居住地域に電力を託送する必要が出てくる。従来の送電インフラを活用することを考えた場合に、その送電限界、あるいは電圧降下により、託送できる範囲が限定的になると考えられる。超電導発電機を導入することで得られる低インピーダンスの効果は、既存の送電インフラを活用し、昇圧設備等の新規導入を可能な限り抑えつつ、より遠方までの電力託送が可能となるため、より広範囲な地域の電力需給調整に対応することが可能となる。

以上の低インピーダンスの効果については、具体的な系統を対象とした定量的な見積もりが必要であろう。これに関しては別途調査研究等で、電力システムの専門家による定量評価を期待する。

3) 水素コンプレックスを構成する産業

水素コンプレックスの大前提は、コンプレックス内の水素が潤沢にあることであり、水素の大口需要産業が起点となる。即ち、エネルギーキャリアとしての水素と、原料としての水素のマルチユースが想定される。安定して潤沢な水素貯蔵を実現し収益を拡大するために、マルチユースを追求することは事業活動として健全な姿勢である。また、エネルギー貯蔵としての液体水素の冷熱を可能な限り有効に使い、それを水素入手コストに反映させることを考えると、冷熱利用産業が集積されることは、経済合理性がある。またさらに、超電導電力機器が生む、電力品質の付加価値が訴求できる場合に、その経済合理性はさらに高まる。

以上の点を鑑みた時に、①水素大口需要産業、②冷熱利用産業、③高品質電力需要産業の複合産業、また、④超電導装置を備える先端医療施設が集積した水素コンプレックスの概念が提起される。

4-1) 水素大口需要産業

水素コンプレックスは水素の需要産業が起点となり水素が潤沢に存在する環境を用意することが前提となる。水素は、石油化学や硝子、金属、半導体などの一部工業で原料もしくは副生成物として扱われてきた化学品であり、これらの産業を起点とした水素コンプレックスも考えられる。しかし、将来的に水素需要が高まることが予想される水素還元製鉄を水素コンプレックスの起点

とすることは、水素コンプレックスの導入時期との時間的なマッチングを考えると合理的であると考えられる。

環境省が発行する「2020年度（令和2年度）温室効果ガス排出量（確報値）について」によると、エネルギー起源 CO2 排出量は国内で9億 6,700万トンでありその37%が産業部門から排出されている。産業部門の排出の内37%が鉄鋼業からの排出で最も多く、カーボンニュートラル実現には鉄鋼業からの CO2 排出削減の位置づけは非常に大きい。NEDO 委託事業「COURSE50」など、鉄鋼製品の製造における CO2 排出抑制のための技術開発が推進されており、製鉄における水素活用として、水素還元製鉄に対する期待も大きい。水素を大量に消費する水素還元製鉄は、2030年頃から部分導入されていくことを鑑みると、将来的に水素大口需要産業として水素コンプレックスの起点に据えることが考えられる。製鉄業にとっては、水素を単体事業で確保するのではなく、発電や冷熱利用産業、高品質電力需要産業と協調して確保、貯蔵することになるため、原料となる水素の安定供給につながる。また、再生可能エネルギー或いは水素発電由来の電力での事業推進が可能となり、カーボンニュートラル貢献に対する社会的責任を追求することができる。

ところで、エネルギーキャリアとしての水素は、液体水素の他、アンモニア、MCH が考えられる。IRENA のレポート（GLOBAL HYDROGEN TRADE TO MEET THE 1.5°C CLIMATE GOAL, 2022）によると、液体水素を用いた場合の水素 1kg あたり輸送コストは約 4.0USD/kgH₂ であるのに対して、アンモニア、MCH は約 2.6USD/kgH₂ であり、現状はアンモニア、MCH の方が経済合理的である。しかし、水素コンプレックスが社会実装されるであろう 2040 年以降においては、（楽観的な見積りの注記があるものの）液体水素、アンモニアは共に 1.0USD/kgH₂ を下回り、2050 年には 0.7~1.2USD/kgH₂ まで下がり、液体水素、アンモニアはほぼ同等の輸送コストになる可能性が指摘されている。また、資源エネルギー庁の資料（水素・アンモニアを取り巻く現状と 今後の検討の方向性（令和4年3月29日））によると、水素・アンモニアは、輸送・発電・産業といった多様な分野の脱炭素化に寄与する、カーボンニュートラル(CN)に必要な不可欠なエネルギー源とされる。ただし、アンモニアは燃焼すると有害な NO_x を排出するため、カーボンニュートラルに貢献するものの別の環境問題を誘発する可能性がある。我々が提案する水素コンプレックスは事業構造として、液体水素のコスト低下を狙い、液体水素の普及を図るものである。

4-2) 冷熱利用産業

液体水素のコストを低下させるには、-253°C (20K) という極低温の冷熱を破棄せずに利用し、コストに還元させるのが良い。そのためには、20K 及びそれより高温域の冷熱を利用する冷熱利用産業を集積させる。冷熱利用産業にとっては、大量の液体水素が存在し、冷熱は水道インフラの如く利用できる環境は魅力的に映るだろう。冷熱利用産業は自ら極低温環境を作り出す必要がなく、必要な時に、必要な量だけ、費用は払うが低価格で冷熱を使用することができる。冷熱利用で得られる収益の一部を、水素入手コストに充てることで水素普及を促す。

具体的な冷熱利用産業は今後の調査が必要であるが、20K 帯域で有効な冷熱活用産業としては深冷分離が挙げられる。深冷分離では、アルゴン、窒素、酸素などの化学産業、半導体プロセス等で一般的に用いられる工業ガスを精製することができるため、得られた生成ガスをコンプレッ

クス内の他の産業で利用することが可能である。また、予てより 200K 前後の温度帯域での冷熱を用いた(即ち、20K 帯域での冷熱利用の後のカスケード利用が想定される)CO₂ 回収技術(Cryogenic Carbon Capture, CCC)が国内外問わず研究されており、これが実証、実用化された場合においては、必要な冷熱がインフラとして整備された水素コンプレックスへの導入は合理的な選択となり得る。文献(“Review of Cryogenic Carbon Capture Innovation and Their Potential Application”, Journal of Carbon Research, 7, 58, 2021)などによると、CCCは、(物理/化学)吸着、吸収、膜分離などの他のCO₂回収技術に比べて、高純度のCO₂を大量に得ることができ、毒性のある化学物質を不要とすること、大気圧で運用できることなどが利点として挙げられる。これらは2050年断面の将来のCO₂回収技術としては魅力的であると考えられる。逆に、CCCの欠点は現状実証フェーズにないことや、凍結抑制が必要であること、また冷却に大量のエネルギーが必要なこと、などが挙げられる。この内、冷却に大量のエネルギーが必要なこと、については水素コンプレックスの冷熱インフラが解決する。

以上のような冷熱需要産業が水素コンプレックスに集積することで、廃棄される冷熱を積極的に利用し、収益に反映、結果として水素入手コスト等の抑制につなげることが可能となる。

4-3) 高品質電力需要産業

水素コンプレックスに付与する別の付加価値としての高品質電力について言及する。高品質電力といった場合には、電力システムの安定運用、つまり周波数、電圧、系統安定性(同期化力、慣性力)の観点で議論がなされ、超電導発電機は低インピーダンスであることから、電力システムの安定運用へ大きく貢献することは前述の通りである。一方、負荷変動補償や瞬時電圧低下補償など秒単位の変動に対する対策が特に重要となる産業はあると考えられる。具体的な事例に関しては今後調査を必要とするが、例えば高精度に品質を担保し、微小な電圧或いは周波数変動が製品歩留率に影響するような半導体製造においては、負荷変動、瞬時電圧低下補償などの電力品質を担保することが今後益々重要となる可能性がある。半導体プロセスは微細化つれて、より高精度なプロセス制御が求められ、下流のフィルター対策に加えて、系統の電力品質の向上が品質担保に重要となる事態が考えられる。或いは、データセンター(DC)においても、瞬時電圧低下等によるスレーブ脱離などの影響が考えられる。特に、今後の普及が想像されるインターネットDCなどでは、スレーブ脱離或いは電力品質の低下による通信エラーは通信インフラとして確実に避けるべき不具合事案であり、これらを補償する仕組みが必要となることが想定される。

負荷変動補償や瞬時電圧低下補償など秒単位の変動に対応する方策としては大容量キャパシタなどの導入が考えられるが、現状は10kW以下の規模に留まり、その運用は家庭用や運輸用の用途に限定されると考えられる。また、寿命が短いという課題もある。そこで、超電導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES)の導入が検討される。SMESは1MW~100MW級の電力の充放電が可能であり、原理的には充放電による劣化はないとされる。我が国では「超電導電力貯蔵システム」(NEDO、1999年~2004年)、「超電導電力機器技術開発」(NEDO、2008年~2012年)においてSMESの開発が行われてきた。ここでは、系統安定化、負荷変動補償(有効電力変動補償、電圧変動補償)、瞬時電圧低下補償、分散型電源連系用途において、初期コスト、運用コストを鑑みたSMESの経済合理性に

ついて検討がされており、特に、Y系超電導を用いた SMES において、競合技術であるフライホイール、SVC/STATCOM、蓄電池、電気二重層キャパシタに対して、高い経済性が示されている。また、ここで提案する水素コンプレックス内においては、前述の通り冷熱利用がインフラとして整っているため、SMES の欠点であった冷却コストが大幅に抑制される。特に、前述の超電導 MG との組み合わせで必要となる蓄電用途、系統安定性、負荷変動補償、瞬低補償等の kW の瞬時調整が必要な場合における SMES の役割は大きい。また、冷熱を利用すればするほど、液体水素の入手価格が下がる、水素コンプレックス構想においては大きな価値を付与する可能性がある。或いは、高品質電力供給という付加価値を一部液体水素の入手コストに充てれば、水素普及も促進できる。

上記の 2004 年頃の SMES の経済性評価は、競合技術の進歩も考えると 2023 年現在に対してそのまま適用できる考察にはならないが、再エネ導入比率の向上、水素社会の到来という 2 つの大きな変化点において、SMES、超電導発電機、超伝導 MG を融合した新しい超電導電力システムはカーボンニュートラル実現の推進力としての役割を担う。わが国のカーボンニュートラル貢献、エネルギー安全保障への貢献することのみならず、新興国を初めとした諸外国へ輸出することで、わが国がカーボンニュートラル実現への世界の先導者となるための革新的技術、事業になると考えられる。

4-4) 先端医療施設

近年粒子線治療装置など粒子線加速器を用いたガン治療が普及しつつあり、陽子線だけでなく治療効果の大きな重粒子線治療装置に開発されている。重い核種を加速して患部に照射するためにビームを輸送するための重粒子線治療装置用の電磁石は陽子線に比べると磁場強度が必要となるため大型化、重量が大きくなる。小型化のために超電導化による小型化が期待されている。患者に対して 360 度回転してビームを出射する重粒子線治療装置用の回転ガントリでは冷凍機による超電導磁石の冷却が一般的であるが、地上に固定された電磁石は必ずしも冷凍機冷却の必要はない。液体水素の冷熱がふんだんにある水素コンプレックスに超電導加速器を設置すれば、その冷却の一部を液体水素の冷熱で賄うことができる。液体水素の沸点は 20K であるが必ずしも 20K で超電導磁石を運転することにはならない。冷凍機は低温の熱をくみ上げて高温側に捨てる仕事をするが仕事の量は温度差によって決まるため、蒸発した水素ガスを高温側の排熱先として冷凍機を運転することによって仕事量を減らし（電力消費量を低減し）20K 以下で超電導磁石を運転することが可能となる。

また、新しいがん治療として標的アイソトープ治療 (Targeted Radionuclide Therapy: TRT)、標的 α 線治療 (Targeted Alpha Therapy: TAT) が開発されている。がん細胞に特異的に結合する分子標的薬と半減期の短い放射線各種を結合した薬剤を投与し、がん細胞に薬剤を集積させ核種の放射性崩壊に伴い放出される放射線によってがんを消滅させるものである。 α 線放出核の製造のためには加速器が必要であり、大阪大学ではサイクロトロンを用いてヘリウムビームを使って ^{211}At を製造している。空芯型の高温超電導磁石をつかった低消費電力のスケルトンサイクロトロンの開発を行っており装置の省エネ化、小型化により普及を目指している。

4) 水素コンプレックスのその他の付加価値

水素コンプレックスは、超電導が推進力となり、複合企業体がカーボンニュートラル実現へ向けて協調できる概念であるが、以下のような付加価値も提供されると考えられる。

まず考えられるのがエネルギーマネジメントシステムとしてのデジタルプラットフォームである。超電導発電機の低インピーダンスにより遠方地との電力需給が可能となると、電力需要、再生可能エネルギーによる発電量、地域内電力消費の予測に加えて、液体水素貯蔵量、輸入量、余剰電量による水素製造量、SMES（あるいは蓄電池）への蓄電、地域内電力消費の時々刻々とした制御が要求される。さらに冷熱活用の観点を加えるとこのようなデジタルプラットフォームは非常に複雑かつ高度になることが予想される。ここでの取引はP2P（Peer to Peer）の形態が想定されるが、個々の取引の適切な把握と円滑な取引遂行のためには、例えばブロックチェーン技術を活用したプラットフォームを構築する必要もあるかもしれない。超電導発電機の低インピーダンスの効果により電力の遠方託送が普及した未来において、P2P 取引を実現するプラットフォームの構築が必要となり、わが国のデジタルインフラの強化に繋がる。

この水素コンプレックス構想は、単一企業体では到底なし得ない。多くの企業、産業が戦略的に集積し、カーボンニュートラル実現という社会命題と事業継続性を両立する一つの産業を構築すべきである。そのためには、複合企業体を取り纏め、共同で事業推進するコンソーシアムの形態が有望である可能性があり、この具体化を進める必要がある。

水素コンプレックスにおける超電導電力システムの先には、昨今先進各国でも開発が加速しつつある核融合発電が待ち構えている。核融合には超電導技術が必須であり、これに向けた技術継続、人材育成という観点も、国策として非常に重要な視点であると考えられる。超電導技術の継続的深化（同時に、再エネ導入、水素社会、カーボンニュートラル実現という社会課題解決の推進力となる）は先進各国を環境対策で先導し、技術大国としての日本国の象徴となり得る、大変意義深い課題であると考えられる。

APPENDIX-3 海外とのマクロ分析比較

(A) 海外とのマクロ分析比較 1 (共通)

	日本	欧州	米国	中国, 他
政治	COP21にて脱炭素化加速。ウクライナ危機でさらに再エネ加速。 脱炭素化社会（2050年カーボンニュートラル）の推進 FIT, 2022年4月からFIP導入予定	脱炭素社会を世界でいち早く実現する政策を進めている 脱炭素化社会の推進 加盟国の再エネ支援策に関するガイドライン（国家補助ガイドライン）の策定 各種基金を通じた再エネ含む低炭素技術の開発支援	バイデン米大統領により「パリ協定」に復帰する大統領令に署名し、2050年までに二酸化炭素排出量実質ゼロと、2035年までに電力部門の脱炭素をめざすことを表明 連邦政府：投資税額控除(ITC), 発電税額控除(PTC) 州政府：RPS(Renewable Portfolio Standard, 再生可能エネルギー利用割合基準), ネットメータリング	脱炭素化社会の推進（2060年までに二酸化炭素（CO2）の排出を実質ゼロ）→3060目標 中国金融学会グリーン金融専門委員会が「カーボンニュートラル目標とグリーン金融ロードマップに関する研究（概要版）」と題する報告書を発表 FIT(2022年を目途に、大部分の電源に対する国家補助は廃止予定) RPS(2020年から実施) グリーン電力証書
経済	水素インフラ導入 輸入エネルギーの依存度は大きい。原子力が減少、再エネの発電量が上昇するも、依然として輸入に頼っている。	各国によって状況は異なる。英国、スペインは輸入エネルギーへの依存度が増加傾向だが、その他は横ばい。イタリア・スペイン以外は再エネ発電量は上昇	輸入エネルギーの依存度は年々減少傾向である。再エネ関係の発電量の上昇が著しい	中国銀行も「21年第4四半期以降、すでに契約済みの案件を除いて、海外の新規石炭採掘および新規石炭発電プロジェクトへの融資を行わない」と表明 輸入エネルギーへの依存度は低いが、近年は依存度が若干増加傾向。再エネ関係発電量の上昇著しいが、発電量そのものの上昇度も高い
社会	2019年時点における電源構成比率は再生エネルギー18%、原子力6%、火力76%である。2021年に策定された第6次エネルギー基本計画において、2030年時点の野心的な見通しとして、再生エネルギー36-38%、原子力20-22%、火力（水素、アンモニア）1%以上、火力（石炭、石油、天然ガス）41%と掲げている。特に、再生エネルギーは構成比として2倍以上を想定しており、電力安定供給に関する課題が大きい。電力発電としての水素発電は電源構成比として1%程度に留まる見通しであるが、液化水素の液化・運搬コスト、冷熱の利活用に革新的な技術が導入されれば、CN実現の必須電力としてその電源構成比率は上昇すると考えられる。	脱炭素社会を目指すことを社会として容認・推進しており、それに沿った価値観の創出、社会行動を行っている 2030年までにヨーロッパの100都市のカーボンニュートラル化を目標とし、脱炭素化へのアプローチを進めようとしている。	地球環境への意識は高く、必要と思えば大きな投資を惜しまない社会風土がある。	【中国】【韓国】電力需要増加 ・都市部での電力集中

(B) 海外とのマクロ分析比較 2 (発電機)

	日本	欧州	米国	中国, 他
発電機 (風力用)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 10MW 機の調査研究完(2019)。 ・ 風況が比較的安定な大型洋上風力にシフト。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 風力発電が主力電源として位置づけられ、関連産業が確立、成長している。 ・ 1 風車当たりの出力を増やすことを求めている。(特に洋上風力) ・ ナセル重量に制限があり、1 風車当たりの出力を増強するには発電機を軽量化する必要がある。 ・ 発電機の軽量化技術として、超電導を励磁コイル(直流)に適用している。 ・ 大型機も常電導で可能になった現在の KPI は LCOE(Levelized Cost Of Electricity)。永久磁石と比較して HTS では LCOE で優位性が見られないというのが欧州 INNWIND プロジェクトの結論。 	<p>陸上風力が主体 米国 DoE にて(A)REBCO(AMSC), (B)NbTi(GE), (C)永久磁石の三つの予備検討が行われ、2021 年に NbTi の(B)の GE が勝者となり、20.2 million USD (20 億円) のプロジェクトが進行中。 NbTi が勝った主な理由として、最も LCOE が安かった点が考えられる。</p>	—
発電機 (航空機用)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 第 1 回「航空機の脱炭素化に向けた新技術官民協議会」を開催 ・ 航空業界の有志による「ACT FOR SKY」という団体が設立 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 液体水素社会への移行(エアバスへの資金注入への建前?) ・ 電動航空機技術導入のためのスタンダード策定 ・ 2022 年 2 月 4 日、ヨーロッパの航空業界のリーダーたちは、航空の将来の持続可能性と脱炭素化に関するツールズ宣言に署名 ・ Airbus 社は窒素酸化物(NOX)や CO2 排出量の削減といった環境性能に優れた高燃費機体を設計するための研究開発に投資 	<ul style="list-style-type: none"> ・ バイデン米政権は、航空機燃料の脱炭素化について 2050 年を達成時期とすることを検討 ・ 電動航空機技術導入のためのスタンダード策定 ・ 米ユナイテッド航空、脱炭素化へ 4000 万ドル投資 	—
発電機 (一般産業用)	SuperGM 70 MW 級超電導発電機	EcoSwing 3.6 MW 級超電導風力発電機	DOE 100 MVA 級超電導発電機 →コンポーネントの製作、検証で終了?	—

(C) 海外とのマクロ分析比較3 (同期調相機)

	日本	欧州	米国	中国, 他
同期調相機	<p>電力広域的運営推進機関, 「再エネ主力電源化」に向けた技術的課題及びその対応策の検討状況について(2021)※1</p> <p>同期調相機は自励式静止型調相機 (STATCOM) の登場により駆逐されたが, 再生可能エネルギー大量導入に伴い, 高速動作の半導体+耐量が高く慣性力を有する回転機械を組み合わせたハイブリッド方式が提案されている。多分常伝導ならありなのだろう。超電導化してペイするかどうかは不明 (未調査)</p> <p>1) 日立 ABB パワーグリッド車が英国再エネ導入拡大に向け世界初のハイブリッド調相設備の実証を開始 (2020.12.4)※1</p> <p>STATCOM+同期調相機 (常伝導)。</p> <p>2) 超電導発電機 SuperGM(70MW 級) は+47.2Mvar,-82.3Mvar※2</p>	<p>1) グリッドコード※2</p> <p>2) 英国の系統安定性公募(Stability pathfinder phase 1(2019)), 既存火力発電所の蒸気/ガスタービンをフライホイールに置き換え, 同期調相機と接続して系統に慣性力を供給する。デンマークに 250Mvar の同期調相機ある。超電導の場合の経済性評価不明 (未調査)</p> <p>1) Entoso-E が superconducting synchronous condenser について言及, 開発状況不明。※3</p> <p>Best practice performance として 代表的には 20-200Mvar のレンジの同期調相機がグリッドにつながれている。350Mvar まではメーカーはできると言っている。</p> <p>2)デンマーク: Bjaeverskov substation 250Mvar(2013), Fraugde and Herslev substations 900MVA of short-circuit power and +150/-75Mvar(2014)</p> <p>3)ドイツ: Hesse, Germany (2013) -400 ~+900Mvar, 2.5GW Biblis 原発が同期調相機にコンバート</p> <p>4) イタリア: Codrongianos, Italy 250Mvar×2 (2014); Brindisi, Italy +250/-125Mvar (2020.5 announced)</p>	<p>1) グリッドコード※2,3</p> <p>超電導同期発電機の経済性評価不明 (未調査)</p> <p>テキサス州(ERCOT)では発電機慣性の減少が過大となっており, 系統の慣性力を管理</p> <p>1) AMSC 超電導±8MVAR(2005)→12MVAR(2006)を実証, 導入済み。SuperVAR(TM) ※4</p> <p>2) Granite Substatin, Vermont, USA, Northwest Vermont Reliability Project, +25/-12.5Mvars ×4 同期調相機 +25Mvar ×4 シャントバンク(MSC)</p> <p>3) Blackwater startion, New Mexico UST (2019)</p>	<p>1)自然エネルギー財団;アジアスーパーグリッド構想(ASG),2011~</p> <p>2) スマートグリッドに関するモデルプロジェクトと政府技術開発支援 ※4</p> <p>中国ではすでに 50Mvar, 300Mvar の常伝導 (空冷, 水冷) の同期調相機が開発されている。超電導は勝てるのか? (未調査)</p> <p>Southern Power Grid(2018-2021), 2019: 300kvar, 2021: 10Mvar の計画。→ MT-27 にて active power test で 100kW</p> <p>超電導 10Mvar はいつ?</p>

(D) 海外とのマクロ分析比較 4 (モータ、ケーブル)

	日本	欧州	米国	中国, 他
モータ (船舶用)	川崎重工業 3.0 MW 船舶モータ	Siemens 4.0 MW 級モータ	AMSC 36.5 MW 船舶モータ	中国 1 MW モータ
モータ (航空機用)	<ul style="list-style-type: none"> ・第1回「航空機の脱炭素化に向けた新技術官民協議会」を開催 ・航空業界の有志による「ACT FOR SKY」という団体が設立 	<ul style="list-style-type: none"> ・液体水素社会への移行（エアバスへの資金注入への建前？） ・電動航空機技術導入のためのスタンダード策定 ・2022年2月4日、ヨーロッパの航空業界のリーダーたちは、航空の将来の持続可能性と脱炭素化に関するツール宣言に署名 ・Airbus社は窒素酸化物（NOX）やCO2排出量の削減といった環境性能に優れた高燃費機体を設計するための研究開発に投資 	<ul style="list-style-type: none"> ・バイデン米政権は、航空機燃料の脱炭素化について2050年を達成時期とすることを検討 ・電動航空機技術導入のためのスタンダード策定 ・米ユナイテッド航空、脱炭素化へ4000万ドル投資 	—
電力ケーブル	電力用の国プロは終了。鉄道用は開発継続（JST, NEDO） 電力需要伸びず、分散型NW推進 ケーブル実証運転の実績（66kV, 横浜） 事故時の安全性対策に課題	Essen, BestPathsプロジェクト, 他, EUプロ NEXANS活動継続 洋上風力の増加 北部での発電を南部の消費地へ ケーブル実証運転実績6年（12kV, Essen） 限流器と併用	DHSプロジェクト進行中（シカゴ） DOEはプロジェクトなし ケーブルメーカー不在 NWに脆弱部分があり、強化が必要 限流機能付き超電導ケーブルを開発	<ul style="list-style-type: none"> 【中国】上海, 深圳のプロジェクト進行中（電力会社と共同） 【韓国】国プロにて23kV, 154kVケーブル開発（～2017） 【中国】上海電纜, 中天等が活動 【韓国】韓国電力, LSケーブルで商業プロ（Singal） 【中国】上海, 深圳の実系統運転開始（2021年秋） 【韓国】Shingal（2019年11月）運転開始 154kV建設中 三相同軸(23kV)開発中

(E) 海外とのマクロ分析比較 5 (粒子線治療装置)

	日本	欧州	米国	中国, 他
粒子線治療装置 (政治)	2006年のがん対策基本法制定, 2007年のがん対策推進基本計画が閣議決定 重粒子線治療装置の小型化・高度化, 並びに, その普及展開は, 政策文章(※p1)において推進すると明記。	欧州諸国の研究所は, 国・EUのサポートを受け HITRI+(※p2), SEEIIST(※p3), iFAST(※p4)等のプロジェクトを立ち上げ, 超電導化を含めた粒子線治療装置のR&Dを進めている。 2021年にEUはEurope's Beating Cancer Planを発表(※p6)	対がん政策として, バイデンが副大統領時代の2016年にCancer Moonshotを立ち上げるとともに, マルチイオン照射の開発に言及。また, Moonshotの再開も宣言されている(※p5)。今後, 国内開発の可能性。バイデン大統領は2022年2月2日, 「がん・ムーンショット」計画の再活性化を発表した。(※p7) これを受けてASTROが重点領域としてProton and Particle Therapyを提言。(※p8)	2014年医療機器の国産化調達政策を打ち出した。 2018年厚生労働省と中国国家衛生健康委員会の協力覚書(MOC)締結。(※p10) 2021年第14次五カ年計画の項目として, 放射線治療等の大型医療機器および重要部品の研究開発が挙げられた。(※p11)
(経済)	粒子線治療装置の日本企業の世界シェアは2017年で25%程度(※e6) 現在, 日本には粒子線がん治療施設が25ヵ所(重粒子線:6ヵ所, 陽子線:18ヵ所, 重粒子と陽子線の両方:1ヵ所)あり, 重粒子線治療装置に関しては世界一である。国民健康保険の適応範囲が広がりもあり, 超電導化により小型且つ, 低コストな治療装置が開発されれば, 大きな市場規模につながる可能性。	医療機器の国別市場規模は, 2016年でドイツ7%, フランス4%, イギリス3%, イタリア3%(※e6)。2020年SiemensがVarian Medical Systemsを買収 2021年におけるP&S Intelligenceの報告書によると, 世界の粒子線治療市場規模は2021年に7億9,710万ドルで, 2030年までに16億3,440万ドルに達すると予想され, 2021年から2030年の間の年平均成長率は8.3%と予想(※e1)。欧州は最も大きなシェアを占め, 年平均成長率も9%と予想されている。重粒子線治療装置の超電導化により陽子線治療装置同等のサイズ及びコストが実現できれば, 同市場を席巻する可能性がある。	医療機器の国別市場規模は世界最大であり, 2016年で43%(※e6)。粒子線治療装置の世界シェア(陽子に限る)は2017年で25%程度(※e6) 2021年におけるP&S Intelligenceの報告書によると, 世界の粒子線治療市場規模は2021年に7億9,710万ドルで, 2030年までに16億3,440万ドルに達すると予想され, 2021年から2030年の間の年平均成長率は8.3%と予想(※e1)。北米は2番目に大きなシェアを占め, 現在, 北米には約41の陽子線治療センターがあり, 地域市場の成長を加速させている。米国では現在, 陽子線治療装置しかないが, 重粒子線治療装置の超電導化により陽子線治療装置同等のサイズ及びコストが実現できれば, 同市場を席巻する可能性がある。	医療機器の国別市場規模は, 2016年で中国5%, 韓国2%(※e6)。MarketsandMarketsのレポートによると, 中国, インド, ブラジル, メキシコなどの多くの新興国における急速な経済発展と医療費の増加により, これらの国々の質の高い医療へのアクセスが改善されることが期待されており, 粒子線治療の大きな市場となると報告されている(※e2)。GLOBOCAN 2021によると, 2021年にアジア地域では950万人の新規がん症例があり, この数字は2030年までに1280万人に達すると予測され, これらの国々におけるがんの発生率の上昇は, 粒子線治療装置に対する需要の増加をもたらすと予想されている。
(社会)	2018年の一人当たりの医療費支出はUSD4,267, 内公的医療費は84.1%(※s5)。粒子線治療は, 2022年度においても新たな疾患が保険収載されるなど(※s1), その治療効果や有効性が社会的に認知されている。今回の診療報酬改定にて, QSTにおける治療の約7割が保険適応となるなど, 多くの疾患が保険適応となっている。保険対象の治療においては, 高額療養費制度が適応されることで, 多くの患者が粒子線治療の恩恵を享受できる。特に重粒子線治療は治療期間が短く, 患者負担が少ないことから, 働きながら治療できるなど, 社会経済性が高い。	例えば2018年のドイツの一人当たりの医療費支出はUSD5,472, 内公的医療費は77.7%(※s5) 欧州における粒子線施設は2010年当時, 5施設であったが, 2020年には陽子線治療施設を中心に, 30施設と6倍に増加(※s2)。公的保険・民間保険の適用範囲も拡大しており(※s3), 小型で安価な装置が上市されれば, 普及が加速する可能性。	公的医療保険制度は, 高齢者および障害者, 低所得者を対象としたものに限られる(※s4) 2018年の一人当たりの医療費支出はUSD10,624, 内公的医療費は50.4%(※s5) 日本製重粒子線治療装置が拠点病院であるMayo Clinicに導入され, 今後, 米国内で同治療がFDAに承認され, 保険が適用されるようになれば, 重粒子線治療装置の普及が一気に加速する可能性が高い。	中国の2018年の一人当たりの医療費支出はUSD501, 内公的医療費は56.4%(※s5)
(技術)	重粒子線治療は放射線医学総合研究所が, 世界に先駆けて実用化した技術 重粒子線治療において, 世界初となる超電導回転ガントリーを開発し, 普及を進めるなど, 他国に対して技術的優位な立場にある。また, 「量子メス」プロジェクトにおいて, シンクロトロン用超電導電磁石の開発においても世界をリードしている。一方, 陽子線治療においては住友重機械工業が超電導サイクロトロンを開発し(※t1), 今後, 普及が進むと思われる。	HITRI+, SEEIIST, iFASTプロジェクトにおいて, 重粒子線治療用超電導シンクロトロン用超電導電磁石は設計段階にある(※t2)。一方, 陽子線に関してはベルギーのIBAによる超電導サイクロトロンが普及しており, この技術の炭素線治療装置への応用も開発(※t5)。 先行プロジェクトの一つであるHITRIplusにはEUから500万ユーロの予算(※t6)	重粒子線治療装置の超電導化に関する研究開発は現在, 行われていない。陽子線に関しては, VARIANによる超電導サイクロトロン開発・普及が進んでいる。回転ガントリー用超電導電磁石に関しては, LBNLが陽子線用のプロトタイプCanted-Cosine magnetを開発(※t3)。 LBLがDOEより粒子線治療装置開発予算を獲得。LBLはVarian, PSIと共同で陽子線治療用超電導電磁石の開発。(※t7)	山東省の万杰医院にて陽子線治療施設が2004年に稼動。蘭州の近代物理研究所が理化学研究所やドイツGSIなどと国際協力して進めている重イオン研究施設(HIRFL)にて治療用ビームラインが設置され2006年から治療を行うとともに, 新たな重粒子線治療施設を省内2箇所に建設し, 先行の武威は2018年11月に治療を開始。上海では炭素・陽子線治療施設が建設され, 2014年より治療を開始。(※t8) 陽子線治療装置に関しては, 超電導サイクロトロンプロトタイプ機を開発(※t4)。

(F) 海外とのマクロ分析比較 6 (磁気エネルギー貯蔵システム, 核融合)

	日本	欧州	米国	中国, 他
磁気エネルギー貯蔵システム (SMES)	電力会社中心に瞬時電圧低下補償装置として SMES 開発 (10MVA - 1sec) 瞬時電圧低下補償のニーズがあり展開されてきたが, 代替技術に置き換わった。	フランスで電磁推進用パルス電源として SMES (0.8MJ) 開発	瞬時電圧低下補償の μ SMES (1-3MW), D-SMES の商品化	—
核融合 (現状)	ITER の製作部品の一部を請け負う。特に超電導コイルは三菱重工, 東芝が製作し, フランスへの納品が着実に進んでいる。大型装置へのコイル製作では, 従来より高い設置精度も要求され, 日本は線材開発および設置の双方において高い技術を有する。JT-60SA (量研, 那珂市)。超電導コイルを有する大型トカマク装置。2023 年初期に通電試験, 2023 年夏に最初のプラズマ実験を予定。LHD (核融合研, 土岐市) 大型核融合装置への超電導実装という点では世界に先駆けて実施された。20 年以上 (1998 年～) の運用実績。	【英国】 Tokamak Energy 社が高温超電導を実装した小型球状トカマク装置 (ST-HTS) の開発を進めている。 【仏】 ITER (日本を含む国際協力)。超電導コイルを有する大型核融合実験装置。2020 年代のプラズマ運転開始をめざし, 超電導コイル等の部品組み立てが進められている。	SPARC 装置 (スタートアップ企業) にて高温超電導を実装し, 試験を開始。	【中国】 EAST 装置 (ASIPP, 安徽省合肥市), HL-2 M 装置 (SWIP, 四川省成都市) などの超電導装置。 【韓国】 KSTAR 超電導装置
(原型炉以降)	ITER に参加。原型炉は日本独自に進め, 2050 年代を目標とする。	欧州連合関連機関 (EUROfusion) は 22 世紀に世界で 1 テラワット (100 万 kW 発電所 1,000 基分) の核融合発電所が必要であり, 2050 年頃に発電を行う核融合原型炉 (DEMO) を建設すべきと提言。イギリス政府は, 核融合エネルギーは低炭素で安全, かつ継続的で, 事実上無制限のエネルギー源となる究極のクリーンな電力ソリューションになる可能性があるとして位置付け, 2040 年までに核融合発電所を建設するとしている。	ITER に参加。公的機関 (DOE) よりも民間ベースのプロジェクトの動きが目立つ。気候変動を緩和すると同時に社会に電力を供給するため, 核融合エネルギーの開発に向けて積極的に取り組む。アメリカ独自の核融合発電所を 2040 年代までに建設。高温超電導コイルといった技術を利用して, より低コストで小型のパイロットプラントの建設を目指す。	【中国】 ITER に参加しつつ, 別に CFETR 計画 (中国独自の大型核融合実験装置) を進める。それらの R & D 研究施設も新たにスタート。 【韓国】 独自の原型炉 (K-DEMO) チームを立ち上げて設計活動を行っている。
(その他)	2022 年から内閣府に有識者会議「核融合戦略」が立ち上がった。核融合スタートアップ企業への投資拡大も明記されている。	欧州グリーンディール政策。民間核融合エネルギー・スタートアップ企業へは政府系からの投資もある。	民間核融合エネルギースタートアップ企業への投資が積極的に行われている。	—

APPENDIX-4 タスクフォース B 出典リンク

(全体)

[A1] <https://www.nedo.go.jp/content/100930145.pdf>

[A2] <https://www.csj.or.jp/conference/Symposium20220622/HOhsaki.pdf>

[A3] <https://www.csj.or.jp/conference/Symposium20220622/SAkita.pdf>

[A4] <https://www.nedo.go.jp/content/100763659.pdf>

[A5] <https://www.nedo.go.jp/content/100095845.pdf>

[A6] https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcsj/46/6/46_6_320/_pdf

(風力用発電機)

[B1] <https://cordis.europa.eu/article/id/415812-a-pioneeringsuperconducting-generator-supports-lighter-and-more-powerful-wind-turbines>

[B2] <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75698.pdf>

[B3] <https://www.nedo.go.jp/content/100897627.pdf>

[B4] https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/pdf/002_02_02_01.pdf

[B5] <https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2021/0401/aa70bcaa973ef210.html>

[B6] <https://www.nedo.go.jp/content/100897627.pdf>

[B7] <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-10/fy21peerreview-ge-torrey.pdf>

[B8] <https://ieeexplore.ieee.org/document/9794626>

(航空機用発電機)

[C1] <https://www.meti.go.jp/press/2022/06/20220617002/20220617002.html>

[C2] <https://www.wellington.com/jp-jp/professional/insights/biden-clean-energy-plan-regulations-jp>

[C3] <https://jp.reuters.com/article/global-airlines-biofuels-idJPKBN2FB26E>

[C4] <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC128B00S1A011C2000000/>

[C5] https://www.smartcity.jp/post/energy20220328_1137/

[C6] <https://netzeronow.jp/european-aviation-commit-to-net-zero/>

[C7] <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/jp/Documents/manufacturing/ad/jp-ad-decarbonizing-aerospace-jp.pdf>

[C8] <https://www.alterna.co.jp/28629/>

(一般産業用発電機)

[D1] <https://www.osti.gov/servlets/purl/907950>

[D2] https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcsj1966/36/3/36_3_104/_pdf/-char/ja

[D3] https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejjournal1994/124/7/124_7_401/_pdf

(同期調相機)

[F1] https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2020/files/chousei_57_03.pdf

[F2] https://www.occto.or.jp/iinkai/gridcode/2021/files/gridcode_09_12.pdf

[F3] https://www.occto.or.jp/iinkai/gridcode/2021/files/gridcode_06_12.pdf

[F4] <https://eea-strategy.com/%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%82%B9/2976/%E4%B8%96%E7%95%8C%E3%81%AE%E5%90%8C%E6%9C%9F%E8%AA%BF%E7%9B%B8%E6%A9%9F%E5%B8%82%E5%A0%B4%E3%81%AF%E3%80%812022%E5%B9%B4%E3%81%8B%E3%82%892029%E5%B9%B4%E3%81%AE%E4%BA%88%E6%B8%AC%E6%9C%9F%E9%96%93/>

[F5] <https://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2020/12/1204.html>

[F6] https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcsj/41/4/41_4_164/_pdf

[F7] <https://www.entsoe.eu/Technopedia/techsheets/synchronous-condenser>

[F8] <https://www.nsenergybusiness.com/features/featuresuperconducting-support-for-the-grid/#>

(電力ケーブル)

[G1] <https://www.nedo.go.jp/content/100901067.pdf>

[G2] https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_bunkakai_26h_jigo_2_1.html

(磁気エネルギー貯蔵システム)

[H1] https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcsj/56/5/56_262/_pdf/-char/ja

[H2] https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcsj/49/6/49_295/_pdf/-char/ja

[H3] https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcsj/40/5/40_5_141/_pdf/-char/ja

[H4] <https://www.nedo.go.jp/content/100550890.pdf>

(粒子線治療装置)

- [I1] <https://www.hitriplus.eu/>
 - [I2] <https://seeiist.eu/>
 - [I3] <https://ifast-project.eu/home>
 - [I4] <https://www.whitehouse.gov/cancermoonshot/>
 - [I5] https://ec.europa.eu/health/system/files/2022-02/eu_cancer-plan_en_0.pdf
 - [I6] <https://www.cancer.gov/research/key-initiatives/moonshot-cancer-initiative>
 - [I7] <https://www.astro.org/News-and-Publications/What-is-Happening-in-Washington/2022/Letter-supporting-Cancer-Moonshot>
 - [I8] <https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=101530>
 - [I9] https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/healthcare/iryuu/downloadfiles/pdf/countryreport_China.pdf
 - [I10] https://spc.jst.go.jp/policy/national_policy/downloads/r_gvm_2022.pdf
 - [I11] https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/particle-therapy-market?utm_source=PRN&utm_medium=referral&utm_campaign=PRN_PAID
 - [I12] https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/particle-therapy-market-12809137.html?utm_source=Prnewswire&utm_medium=referral&utm_campaign=paidpr
 - [I13] https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/medical_equipment_healthcare/pdf/002_01_02.pdf
 - [I14] https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000188411_00037.html
 - [I15] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167814021090484>
 - [I16] <https://www.jetro.go.jp/world/reports/2021/01/01168598c658e4b0.html>
 - [I17] <https://www.stat.go.jp/data/sekai/pdf/2022a.pdf#page=252>
 - [I18] <https://www.shi.co.jp/info/2021/6kgpsq000000lfgo.html>
 - [I19] <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2021/papers/mopab413.pdf#search=%20domain%3Daccelconf%2Eweb%2Ecern%2Ech%20canted%20cosine%20gantry%20%20url%3Aaccelconf%2Fipac2018%20url%3Aaccelconf%2Fipac2019%20url%3Aaccelconf%2Fhiat2018%20url%3Aaccelconf%2Fnapac2019%20url%3Aaccelconf%2Fipac2021%20url%3Aaccelconf%2Fipac2020%20FileExtension%3Dpdf%20%2Durl%3Aabstract%20%2Durl%3Aaccelconf%2Fjacow>
 - [I20] https://accelconf.web.cern.ch/napac2016/talks/thb1io02_talk.pdf#search=%20domain%3Daccelconf%2Eweb%2Ecern%2Ech%20canted%20cosine%20gantry%20%20FileExtension%3Dpdf%20%2Durl%3Aabstract%20%2Durl%3Aaccelconf%2Fjacow
 - [I21] <https://inspirehep.net/files/954a5c4bfbd78296402368c1234a6591>
 - [I22] <https://www.iba-worldwide.com/content/iba-subsiary-normandy-hadrontherapy-launches-development-carbon-therapy-system-normandy>
 - [I23] <https://cordis.europa.eu/project/id/101008548>
 - [I24] <https://newscenter.lbl.gov/2020/08/24/3-awards-will-support-accelerator-rd-for-medical-treatment-miniaturization-and-machine-learning/>
 - [I25] <https://www.nirs.qst.go.jp/rd/collaboration/himac/overseas.html>
 - [I26] https://www.ile.osaka-u.ac.jp/jp_old/collab/ilesymposium/2018/t_shirai.pdf
- (核融合)
- [J1] <https://science.osti.gov/fes>
 - [J2] <https://www.fusionindustryassociation.org/>
 - [J3] <https://www.gov.uk/government/news/uk-to-take-a-big-step-to-fusion-electricity>
 - [J4] <https://www.euro-fusion.org/>
 - [J5] <https://www.jser.gr.jp/wp-content/uploads/2021/02/21-452.pdf>
 - [J6] https://www.jstage.jst.go.jp/article/taesj/8/1/8_J08.019/_article/-char/ja
 - [J7] <https://www.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=T94001>
 - [J8] <https://www.mhi.com/jp/news/210524.html>
 - [J9] <https://www.global.toshiba/jp/news/energy/2022/09/news-20220928-02.html>
 - [J10] <https://www.fusion.qst.go.jp/rokkasyo/ddjst/>
 - [J11] <https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/index.html>
 - [J12] <http://english.ipp.cas.cn/Research/CRAFT/>
 - [J13] <https://www.qst.go.jp/site/jt60/46114.html>

(誘導加熱装置)

[K1] http://www.istec.or.jp/web21/pdf/15_03/all.pdf

[K2] <https://www.aluminum.or.jp/environment/pdf/2-3-10.pdf>

[K3] <https://www.foundry.jp/data/co2.pdf>

[K4] <https://foundry.jp/bukai/wp-content/uploads/2017/02/b21dde4685c8e3eeca4cde1d770ff4c9.pdf>

APPENDIX-5 共通技術

本文で説明を省略した内容も含め、共通技術の調査結果について詳述する。

1) 超電導導体技術

1-1) 線材技術

現在、応用機器の開発が可能な水準の特性・長さが得られる線材は、Bi2223 多心テープ線材、Bi2212 多心線材、REBCO 薄膜テープ線材、MgB₂ 多心線材である。

Bi2223 多心テープ線材（図表 4）については、長さ方向の特性が十分一様な、キロメートル級の長さの線材が工業的に製造され、長期信頼性も実証されている。多心化は、テープ面方向の曲げに対する劣化を抑制するためのもので、通常、通常ツイストされておらず、交流損失の低減には寄与しない。また、断面に占める銀母材の割合が高く、線材断面に対する臨界電流密度はあまり高くできない。

Bi2212 多心線材（図表 5）は、円断面であるため任意の方向に曲げてコイルを巻くことができ、LTS 線材と同様に矩形導体やラザフォードケーブルのような集合導体を構成できる。ただし、熱処理の技術が確立しているとは言えず、歪み耐性の向上も課題である。

REBCO 薄膜テープ線材（図表 6～8）は、磁界下での臨界電流が大きいことから、現在、応用機器開発にもっとも多用されている線材である。世界で、多数の企業が製造・販売しており、500 km/年/社、1000 km/年/社といった生産能力を公表している会社もある。数百メートル級の線材が製造できるようになっているものの、長さ方向の一様性に関しては、局所的に超電導特性が劣った部分ができることも多く、長尺で長さ方向に一様な線材を歩留まりよく製造する技術の開発が、応用機器に多用していく上ではぜひ必要である。また、コイル技術とも関係するが、交流機器や高い磁界精度が要求される機器に应用する場合には、幅広薄膜形状に起因する大きな磁化が、交流損失や遮蔽電流磁界を大きくしてしまう。磁化を小さくするために、超電導薄膜を細いフィラメントに分割する多心化も試みられているが、フィラメント間を絶縁するとフィラメント間の電流分流が阻害され、長尺臨界電流の劣化や超電導安定性の低下につながる。フィラメント間を銅等で接続する電流分流は可能となるが、銅等を介して流れる結合電流を速やかに減衰させる、LTS 線材のツイストと等価な、なんらかの仕組みの導入が必要となる。

MgB₂ 多心線材（図表 9～11）は、製造コストの低減が期待できることから、近年、様々な応用機器への使用が考えられている線材である。円断面の線材が得られることから、任意の方向に曲げてコイルを巻くことができ、LTS 線材と同様に矩形導体やラザフォードケーブルのような集合導体を構成できる。しかし、現状では、磁界中における臨界電流密度が十分高くないため応用先が限られており、応用先を広げるためにはその向上が期待される。交流応用に向けては、短ピッチでのツイスト、非磁性母材の適用などの技術開発が必要である。コイル化の前ないし後に熱処理を行わなければならない点が欠点であり、歪みに対する耐性の向上も期待される。

各種線材の臨界電流特性については、ウェリントン・ビクトリア大学ロビンソン研究所による測定結果がデータベース化され公開されている (<https://htsdb.wimbush.eu/>)。第三者機関による評価結果が公開されているという点で、貴重なものである。このデータベースから得た臨界電

流の値(臨界電流が一番小さくなる磁界方向での幅 10 mm あたりの値)の一部を図表 12 に掲げた。

1-2) 集合導体技術

Bi2223 多心テープ線材、Bi2212 多心線材、REBCO 薄膜テープ線材、MgB₂ 多心線材は、いずれも、単線の電流容量は数十から二、三百アンペア程度に限られる。そこで、大電流容量が要求される場合には、線材を集合した集合導体が必要となる。大電流容量の導体が必要となるケースとしては、応用機器が、その機能として大電流容量の導体を要求するケースもあれば、交流/変動励磁時や電流遮断時の端子電圧抑制のためインダクタンスを小さくする必要があるケースもある。タービン発電機の巻線、風力発電用発電機の電機子巻線、SMES、航空機用回転機などの交流励磁される電機子巻線などには、集合導体の必要性が高い。また、テープ線材は巻線工程で粗雑に扱うと折れ曲がり損傷してしまうので、コイルを巻くときの取り扱いに注意が必要であり、この点からも、超電導線材を構造部材と複合した集合導体は有利である。

Bi2212 多心線材、MgB₂ 多心線材については、円断面をしており任意の方向に曲げられ、LTS 線材と同様に矩形導体やラザフォードケーブルのような集合導体化が可能である。ただし、集合導体構成後の熱処理、場合によってはそれをコイルに巻いた後の熱処理が必要であり、この点は、後述する REBCO 薄膜テープ線材に比した欠点である。

REBCO 薄膜テープ線材の集合導体は、スパイラル導体、Roebel (ロエベル) ケーブル、スタック導体と類別できる(図表 14)。現時点で製品化されているのは、スパイラル導体の一種である CORC®導体(米国製)と Roebel ケーブル(ニュージーランド製)に限られている。

スパイラル導体(図表 15~17)は、円断面の金属コアのまわりにテープ形状の REBCO 薄膜テープ線材をスパイラル状に多層に巻き付けた導体で、等方な機械・電磁特性をもった導体であり、任意の方向に曲げられることはコイル化の際の大きな利点である。コアがある分だけ導体電流密度が低下してしまうことが欠点であるが、層数が大きい大電流導体では、コアによる導体電流密度の低下は目立たなくなってくる。CORC®導体(図表 15)がスパイラル導体の代表例であり、STAR wire(図表 15)は超伝導層を厚さ方向中央に配置した REBCO 薄膜テープ線材を用いることによりコア径を低減し高電流密度化を図ったスパイラル導体である。京都大学においては、銅複合したマルチフィラメント REBCO 薄膜テープ線材を柔軟なコアのまわりに巻き付けた SCSC ケーブル(Spiral Copper-plated Striated Coated-conductor cable)(図表 16)と名付けられたスパイラル導体が開発されている。マルチフィラメント線材をスパイラルに巻き付けることにより LTS 線材のツイストと等価な働きをさせ、交流損失と磁界精度を損なう遮蔽電流磁界を低減し、同時に、銅層を介した電流分流によりマルチフィラメント化による局所的欠陥や局所的常電導転移に対するロバスト性低下を抑制するものである。

Roebel ケーブル(図表 18)は、コアがないため導体電流密度を高くし易く、素線が転位されており均流化が図れる点で優れている。均流化により、自己の通電電流による通電損失(自己磁界損失)が支配的な使用条件では交流損失を低減できる。一方、フラットワイズ曲げ以外の曲げは困難で、鞍型などの立体形状のコイルに巻くことは難しく、応用上の制約となる。

スタック導体(図表 19~22)は、REBCO 薄膜テープ線材を単純に積層(スタック)したものを

基本要素とした導体である。その多くが、銅やアルミニウムの構造部材の中に積層した REBCO 薄膜テープ線材を挿入し機械的強度を向上させた核融合装置用の導体である。そのような構造上、比較的小さなコイルを巻くことにはあまり適さない。集合導体レベルで、よりを加えて外部変動磁界に対する素線（線材間）の結合を防止したもの（[図表 19~21](#)）と、よりを加えていないもの（[図表 22](#)）がある。

REBCO 薄膜テープ線材を用いた集合導体 3 種類の比較を[図表 23](#)にまとめた。

1-3) コイル技術

Bi2223 多心テープ線材や REBCO 薄膜テープ線材の単線を用いて製作されたコイルのほとんどが、パンケーキコイル、レーストラックコイル（[図表 26](#)）、レイヤー巻きソレノイドコイル（[図表 27](#)）といった、フラットワイズ曲げ中心で巻くことができるコイルである。REBCO 薄膜テープ線材については、フラットワイズ曲げと捩じりを組み合わせることにより、立体形状コイルを巻いた例も少数であるが存在する（[図表 27](#)）。

従来の電気機器の巻線（コイル）の多くで、鞍型巻線や分布巻きなど、フラットワイズ曲げのみでは構成できない立体形状の巻線が見られる。応用機器の概念設計例においては、フラットワイズ曲げによって実現できるレーストラックコイルなどを用いることが多いが、機器として、必ずしも最適な設計とはなっていない可能性もあり、立体形状コイル技術の開発が期待される。

集合導体のコイル化技術には、単線のコイル化技術は異なった部分もある。スパイラル導体は任意の方向に曲げられ立体形状コイルを巻くのに適しており機器応用に向けたポテンシャルは高く、CORC®導体を用いた Canted cosine theta マグネットの製作が報告されている（[図表 28](#)）。Roebel ケーブルで巻いたコイルに関しては、レイヤー巻きソレノイドコイル（[図表 29](#)）や Aligned block（整列ブロック）コイル（[図表 30](#)）がある。後者は、わずかではあるが立体形状をしたコイルである。CORC®導体を用いた立体形状コイルとしては、Canted cosine theta マグネットの製作が報告されている。

小型核融合炉を目指して、MIT において製作・試験されたトロイダル磁界モデルコイル（TFMC）では、200 本以上の REBCO 薄膜テープ線材を積層して、金属プレートにらせん状に切った溝に入れたんだ含浸するというコイル技術が採用されている。このコイルは、ターン間が絶縁されておらず金属プレートを介して電氣的につながった後述する不完全絶縁コイルである。TFMC に先行して製作された小型の REBCO 薄膜テープ線材を積層した不完全絶縁ダブルパンケーキコイルを[図表 28](#)に示した。

REBCO 薄膜テープ線材を用いて樹脂含浸したコイルを巻くと、線材を構成する多層薄膜の間で剥離が起こり、コイルが劣化してしまうことが問題となってきた。この問題は、線材間に意図的に密着性の悪い物質を挿入することにより剥離につながる応力を低減することで一応の解決は見ているが、大型のコイルになると完全に問題が解決できているとは言えない。

HTS コイルは、常電導伝搬速度が遅く、常電導電圧が検出し易いレベルに到達する前にホットスポット温度が上昇し、コイルが劣化・焼損し易い。HTS コイルをクエンチ、熱暴走から保護するための技術として、無絶縁コイルや不完全絶縁コイルというコイル技術が開発されている。こ

れらは、パンケーキコイルやレーストラックコイルのターン間を電氣的に絶縁せず、あるターンに常電導部が発生した場合に、電流を隣接ターンに迂回させ、熱暴走を防止する技術で、高磁界マグネットのインサートコイルなどに有効に適用されている。しかし、クエンチ時に電源からの電流供給を遮断しても、内部では制御できない分布で電流が流れ続けるため、これによりコイルが焼損してしまうこともあり得る。また、無絶縁・不完全絶縁コイルを変動／交流励磁すると、電磁誘導によりターン間に電流が流れ、意図した通りの変動磁界を正確には発生できない。このように、無絶縁・不完全絶縁コイルも万能とは言えず、ターン間を絶縁したふつうのコイルに対する信頼性の高いクエンチ検出・保護技術の開発も期待される。

1-4) 超電導導体概念設計

超電導導体技術のうち、線材技術と集合導体技術について、現状技術水準と要求技術水準を比較・対照するために、Super-GM の同期発電機（70 MW 級モデル機）の界磁巻線用導体の概念設計を行った。Super-GM 実機の LTS 界磁巻線の運転温度が 4.2 K であったのに対して、HTS の高い臨界温度と水素社会における液体水素寒冷利用の可能性を鑑み、運転温度は 20 K ないし、それ以上を想定した。概念設計は、Super-GM の低速応 A 機（高安定導体型）・低速応 B 機（高電流密度導体型）・超速応機の導体を対象に行い、なんらかの具体的な集合導体方式を想定することとした。Super-GM 実機の NbTi 集合導体の諸元を図表 32 に示す。

設計にあたっては、導体電流密度は Super-GM 実機と同程度とし（より高電流密度の例外もあり）、可能な限り、導体電流も Super-GM 機と同程度とした。なお、導体電流密度が同程度であれば、ターン数を変えれば同じ巻線サイズで同程度のアンペアターンを得ることができるはずである。また、線材の臨界電流などについては、公知の現在の技術水準に準拠するものとした（組み合わせは許容）。

運転温度を 20 K とした場合の、低速応 A 機（高安定導体型）・低速応 B 機（高電流密度導体型）・超速応機の導体概念設計結果を、図表 33, 34, 35 にそれぞれ示す。RBCO 薄膜テープ線材の場合、CORC®型ケーブル、SCSC ケーブル、Roebel ケーブルのいずれを用いても、電流・電流密度の観点に限ってみれば、現状技術水準の線材用いて 20 K 運転の界磁巻線用導体が成立し得ることが示された。MgB₂ 多心線材の場合、磁界中での臨界電流が十分大きくないため、巻線全体を構成する導体を設計することはできないが、他の HTS 線材と組み合わせたハイブリッド巻線の低磁界部を分担する導体は成立し得ることが示された。

REBCO 薄膜テープ線材は 20 K より高い温度でも臨界電流特性が良好であるので、より高い温度での利用可能性を見極めるため、SCSC ケーブルを例にとり、運転温度を 40 K とした場合の導体概念設計を行った。低速応 A 機（高安定導体型）・低速応 B 機（高電流密度導体型）・超速応機についての導体設計結果を図表 36 に示す。界磁電流最大値における負荷率が大きくなったものの、40 K 運転の界磁巻線用導体が設計し得ることを示すことができた。

2) 冷却技術

HTS コイルの冷却に関する実験的な報告例（図表 38～40）としては、小型冷凍機による伝導冷

却（5-数十 K）、液体窒素循環冷却（64-77 K）、液体ネオンによるサーモサイフォンやヒートパイプ（27-30 K）、固体窒素冷却（10 K）、気体ヘリウムの循環冷却（10 K）、液体水素による浸漬冷却やサーモサイフォン（20 K）などの報告例がある。

65 - 77 K では磁界下における高温超電導線材の臨界電流が十分大きいとはいえないため、液体窒素冷却を適用できる応用機器は限られる。小型冷凍機による伝導冷却は、小型の直流励磁コイルの冷却には適しているが、大型コイルや交流損失が発生する交流・変動励磁コイルへの適用は難しい。気体ヘリウムの循環冷却は、大型コイル、熱負荷の大きなコイルを 4.2 K の液体ヘリウム温度に比べて高い温度領域で冷却するための、現時点での唯一の実用的な技術である。

LTS コイルの冷却は、小型冷凍機による伝導冷却以外は、冷媒としてヘリウムを使うものがほとんどであった。HTS コイルの場合は、広い温度領域での利用が可能となるので、各種の冷媒の特性について知ることが重要である。そこで、気体ヘリウム、液体水素、液体ネオン、液体窒素、液化天然ガスの 1 気圧における沸点、臨界点、密度、潜熱、粘性係数、比熱を [図表 42](#) にまとめた。

Super-GM の 70 MW 発電機 ([図表 43~44](#)) では、NbTi 超電導線を用いた界磁コイルを回転子に組み込み液体ヘリウムで冷却し、定格回転・発電に成功している。回転子への極低温液体の導入、回転部のシール、回転状態でのコイルの冷却など、液体ヘリウムを液体水素に置き換えても参考となる技術は多い ([図表 45~48](#))。

LTS におけるケーブルインコンジット導体は、コンジットと呼ばれる金属管に LTS 線材を撚り合わせたケーブルを収納し、コンジットに超臨界ヘリウムを循環させる。このような技術を強制冷却という。強制冷却は、ヘリウム使用のままで、あるいは、超臨界ヘリウムを超臨界水素に置き換えて、HTS コイルに適用できると考えられる。そこで、LTS において培われてきた強制冷却技術について、[図表 49~52](#) にまとめた。

このほか、高エネルギー物理学研究用の粒子検出器用マグネットにおいては、ヘリウムによる間接冷却を用いたアルミニウム安定化導体が用いられた。このマグネットではヘリウムが循環するチャンネルと超電導線は離れた位置にあり、アルミニウムを介した熱伝導で超伝導線は冷却される。この冷却技術も、ヘリウム使用のままで、あるいは、ヘリウムを水素に置き換えて、HTS コイルに適用できると考えられる。

<機器開発の中の共通技術>

共通技術を調査するにあたり、シーズ側から共通技術ごとに調査するアプローチと、先行機器開発例を調査し、その名からから共通技術の現状・ニーズを調査するアプローチを組み合わせた。後者のアプローチによる調査結果を [図表 53~74](#) に掲げた。

APPENDIX-5 共通技術 図表

超電導導体技術

線材技術

Bi2223線材

図表 4

メーカー	種類		平均幅 /mm	平均厚 /mm	マトリックス	補強材 (厚さ)	臨界電流 Ic(77K, s.f.)	引張力 室温 95%Ic維持	引張力 室温 95%Ic維持	引張歪室温 95%Ic維持	曲げ径 室温 95%Ic維持	応用例
住友電工 [WT1]	TypeH	高電流密度型	4.3 ±0.2	0.23 ±0.01	銀合金	-	170 ~200	80N	130MPa	0.2%	80mm	電流リード
	TypeG	低熱伝導度型	4.3 ±0.2	0.23 ±0.01	Ag-Au5.4wt%	-		80N	130MPa	0.2%	80mm	
	Type HT-SS	高強度型	4.5 ±0.1	0.29 ±0.02	銀合金	ステンレス (0.02mm)		230N	270MPa	0.4%	60mm	マグネット
	Type HT-CA		4.5 ±0.1	0.34 ±0.02	銀合金	Cu合金 (0.05mm)		280N	250MPa	0.3%	60mm	ケーブル
	Type HT-NX		4.5 ±0.1	0.31 ±0.03	銀合金	Ni合金 (0.03mm)		410N	400MPa	0.5%	40mm	高磁場マグネット
InnoST (中)[WT2]			4.3 ±0.3	0.23 ±0.03	銀	-	130 ~170	-	80MPa	-	30mm	-

Type H の線材横断面写真



Type G の線材横断面写真



Type HT-SS の線材横断面写真



Type HT-CA の線材横断面写真



Type HT-NX の線材横断面写真



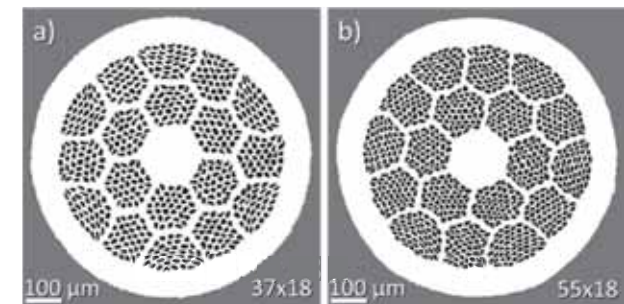
Bi2212線材

図表 5

メーカー	フィラメント数	形状	直径/mm	平均幅/mm	平均厚/mm	マトリックス	補強材(厚さ)	臨界電流 Ic(77K,s.f.)	臨界電流 Ic(4.2K,5T)	臨界電流 Ic(4.2K,15T)	引張力 77K 95%Ic維持※5	引張力 77K 95%Ic維持※5
OST※1,2 [WT3]	37 × 18	丸線	0.8	-	-	中: Ag 外: Ag合金	-	10.3 ±0.2A	-	-	150MPa	0.6%
OST※1,3 [WT4]	37 × 18	丸線	0.8	-	-	記載なし	-	-	360A	260A	-	-
OST※1,4 [WT5]	85 × 18	丸線	1.3	-	-	中: Ag 外: Ag合金	-	-	881A	-	>200 MPa	0.6%
OST※1,4 [WT5]	85 × 18	平角線	-	1.2	0.54	中: Ag 外: Ag合金	-	-	429A	-	150~160 MPa	>0.6%
OST※1,4 [WT5]	85 × 18	平角線	-	1.2	0.77	中: Ag 外: Ag合金	高強度合金 (0.1mm)	-	466A	-	300MPa	>0.4%
NIN ※6 [WT6]	19 × 18	丸線	1.0	-	-	中: Ag 外: Ag合金	-	-	~400A	~146A	-	-

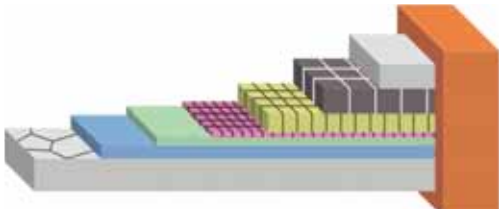
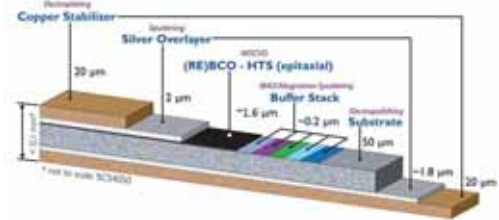

- ※1: Oxford Superconducting Technology (現Bruker-OST)
- ※2: 文献[WT3]のFig. 2とFig. 3より計算
- ※3: 文献[WT4]のTable 1よりIcを計算し平均
- ※4: 文献[WT5]のEig. 6とTable 1より
- ※5: 引張応力をかけた後除荷した状態で77Ks.f.もしくは4.2K5Tで評価し、95%のIcを維持する値
- ※6: NIN:Northwest Institute for non-ferrous Metal Research

線材断面 [WT4]



REBCO線材 (1)

図表 6

	Fujikura [WT7]		SuperPower [WT8]		SuerOx [WT9]	
	FESC	FYSC	AP type	HM type	REBCO(w/oAPC)	REBCO(APC)
線材厚(mm)	0.11	0.13	--	--	--	--
線材幅(mm)	2, 3, 4, 12	4, 12	2, 3, 4, 6, 12	2, 3, 4, 6, 12	4,12	4,12
超電導材料	GdBCO	EuBCO+BHO	REBCO	REBCO	GdBCO	YBCO+Y2O3
基板厚 (μm)	75	50	50, 30	50, 30	30, 35, 40, 60, 100	30, 35, 40, 60, 100
安定化銅 標準厚	20 μm x2	20 μm x2	20 μm x2	20 μm x2	--	--
Ic(77K,s.f.)(4mm)	85	165	120~160	80~120	166~233	150~200
磁場中Ic (4mm)	663 (20K, 5T)	368 (20K, 5T)	--	--	--	--
引張応力(MPa)	600	600	550 (50 μm)	550(50 μm)	500	500
引張歪み	0.4%	0.4%	-	-	0.4%	0.4%
許容曲げ半径(mm)	10	15	11(50 μm), 6(30 μm)	11(50 μm), 6(30 μm)	<10(30-40 μm) 15(60 μm)	<10(30-40 μm) 15(60 μm)
模式図						

REBCO線材 (2)

図表 7

	上海SC [WT10]			SuNAM [WT11]		
	Copper Plating	Copper lamination	SS304 lamination	AN	CN	LB/LS Brass/SS lamination
線材厚(mm)	0.065, 0.075, 0.095	0.205, 0.255	0.215	HAS:0.06-0.07 SS:0.11-0.12	HAS:0.09-0.11 SS:0.14-0.16	HAS:0.18-0.22 SS:0.23-0.27
線材幅(mm)	3.3,4,10	4.8,6,12	4.8,6,12	4,12 (2~10可)	4,12 (2~10可)	4,12(2~10可)
超電導材料	--	--	--	GdBCO	GdBCO	GdBCO
基板厚 (μm)	30,50	30,50	30,50	--	--	--
安定化銅 標準厚	5x2, 10x2, 20x2	75x2,100x2	80x2	no	--	--
Ic(77K,s.f.)(4mm)	190	190	190	150~200	150~200	150~200
磁場中Ic (4mm)	--	--	--	--	--	--
引張応力(MPa)	--	400	--	--	660-710MPa	514-524MPa
引張歪み	--	--	--	--	0.8-0.85%	1.1%
許容曲げ半径(mm)	--	--	--	--	15	15
模式図						


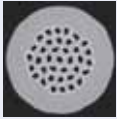



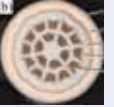
REBCO線材 (3)

図表 8

	THEVA [WT12]		Samri [WT13]	
	Copper Plating	Copper lamination	Copper plating	SS Lamination
線材厚(mm)	0.065-0.075	0.16	--	--
線材幅(mm)	3, 4, 6, 12	3, 4, 6, 12	2, 4, 12	2, 4, 12
超電導材料	GdBCO	GdBCO	REBCOのみ表記	REBCOのみ表記
基板厚 (μm)	50, 100	50,100	50-65	50-65
安定化銅 標準厚	--	--	20x2	175
Ic(77K,s.f.)(4mm)	250-333	250-333	249	249
磁場中Ic (4mm)	--	--	--	--
引張応力(MPa)	--	--	--	--
引張歪み	--	--	--	--
許容曲げ半径(mm)	60(100 μm), 40(50 μm)		--	--
模式図				

MgB₂線材 (1)






図表 9

	ASG [WT14-WT22]		HyperTech [WT23-WT28]		Hitachi [WT29-WT31]	
主な用途	オープン型MRI	送電	汎用	MRI	主にW&R	R&W
製造方法	Ex situ		In situ		In situ	
Je (MgB ₂ 占積率) 別途グラフあり	72A/mm ² (10%) (Ic 168 A) @ 20K, 1T	237A/mm ² (10%) (Ic 186 A) @ 25K, 1T	140A/mm ² (11%) (Ic 70 A) @ 20K, 3T	49.4A/mm ² (12.5%) (Ic 74 A) @ 20K, 3T	170 A/mm ² (28%) (Ic 60 A) @ 20K, 3T	153 A/mm ² (17%) (Ic 161 A) @ 20K, 3T
加工単位長 (体積)	4 km (9,360cm ³)	13 km (10,205 cm ³)	≧ 828 m (≧ 458 cm ³)	≧ 1.7 km (≧ 2,616 cm ³)	8.1 km (2,854 cm ³)	-
不可逆ひずみ (熱処理後)	- -	0.29% @ RT 0.35% @ 4.2K	- 0.28% @ 4.2K	(0.4% @ RT)設計値 -	0.19% @ RT -	0.6% @ RT -
不可逆応力			276 MPa @ 4.2 K 参考値	-		
最小曲げ半径 (熱処理後)	150 mm @ RT	100 mm @ RT	-	(214 mm @ RT) 設計値	134 mm @ RT	57 mm @ RT
断面形状	MgB ₂ /Fe/Ni/Cu 3.6 x 0.65 mm 	MgB ₂ /Nb/Ni/Monel/Cu /Sn Φ 1.0 mm 	MgB ₂ /Nb/Cu/Monel Φ 0.84 mm 	MgB ₂ /Nb/Cu/Monel Φ 1.5 x 1.0 mm 	MgB ₂ /Fe/Cu/Monel Φ 0.67 mm 	MgB ₂ /Fe/SUS/Cu /Monel Φ 1.16 mm 

MgB₂線材（2）

図表 10

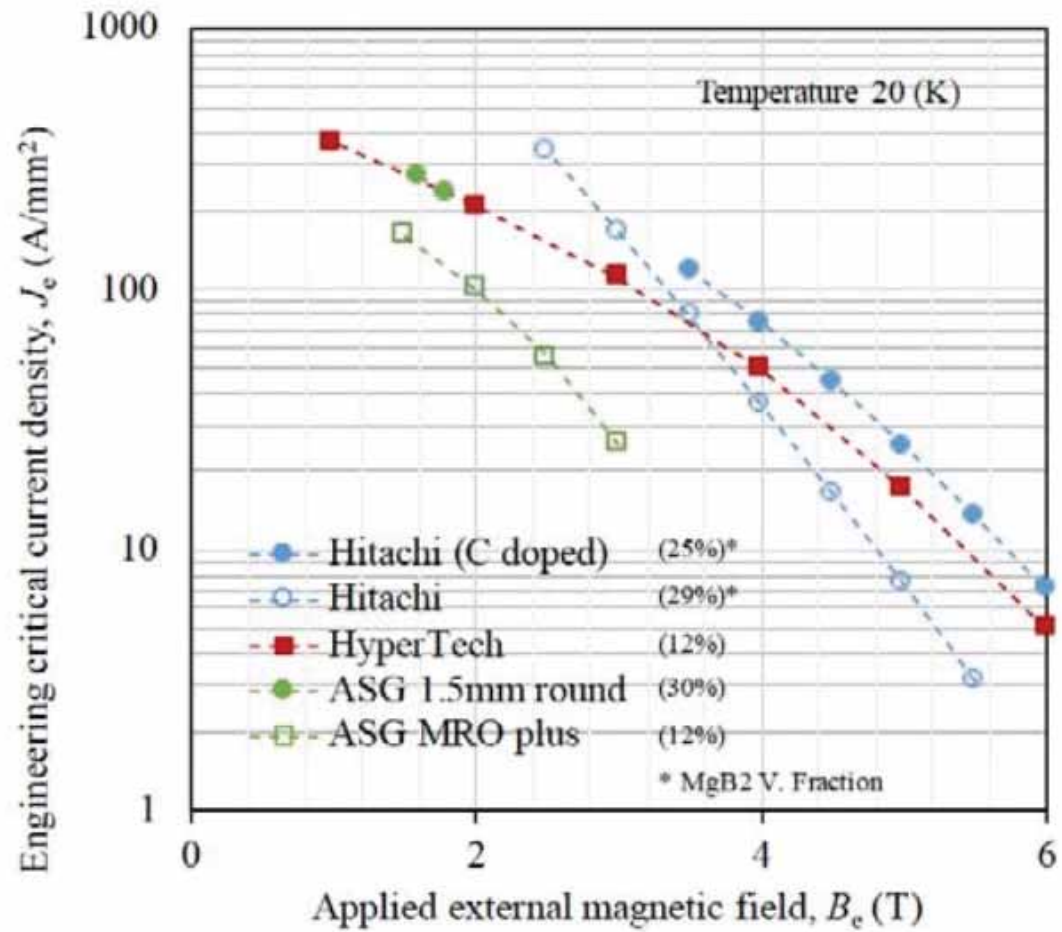
低交流損失線材（R&D）

	HyperTech（低交流損失）[WT33, WT34]				Hitachi（低交流損失）[WT35]
製造方法	In situ				In situ
Je (MgB ₂ 占積率)	84 A/mm ² (11.2%) @4.2K, 5.5T -	80 A/mm ² (12.1%) @4.2K, 5.5T -	30 A/mm ² (9.1%) @4.2K, 5.5T -	22 A/mm ² (6.4%) @4.2K, 5.5T -	- 200 A/mm ² (7%)@20K, 3T
Jc	750 A/mm ² @ 4.2K, 5.5T -	661 A/mm ² @ 4.2K, 5.5T -	330 A/mm ² @ 4.2K, 5.5T -	343 A/mm ² @ 4.2K, 5.5T -	1.2 kA/mm ² @4.2K, 5.5T 500 A/mm ² @20K, 3T
フィラメント径	20 μm	19.5 μm	18 μm	14 μm	30 μm
フィラメント数	114	114	192	342	51
ツイストピッチ	≧ 5.0 mm	10-30 mm	10-30 mm	10-30 mm	≧ 5.7 mm
断面形状	MgB ₂ /Nb/CuNi10/Cu/CuNi30, Φ 0.6 mm 	MgB ₂ /Nb/CuNi10/Cu/CuNi30, Φ 0.56 mm 	MgB ₂ /Nb/CuNi10/Cu/CuNi30, Φ 0.86 mm 	MgB ₂ /Nb/CuNi10/Cu/Monel, Φ 0.92 mm 	MgB ₂ /Nb/CuNi10/Monel, Φ 0.6 mm 

MgB₂線材 (3)

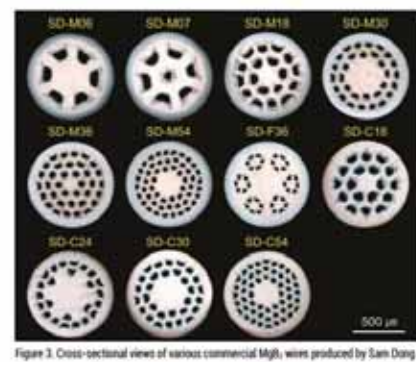
図表 11

Jeの比較 [WT36]



第4、第5のサプライヤー

Sam Dong [WT37]

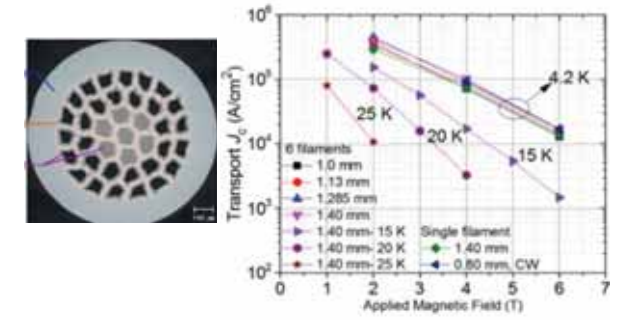


生産能力

ASG [WT22]

100 km/month

WST [WT38, WT39]



価格

ASG [WT21]

10\$/kA/m
温度、磁場不明

HyperTech [WT28]

(2015年時点、Φ 1mm 丸線)
10\$/kA/m for 20K, 1T
20\$/kA/m for 20K, 2T
50\$/kA/m for 20K, 3T

各種線材の臨界電流

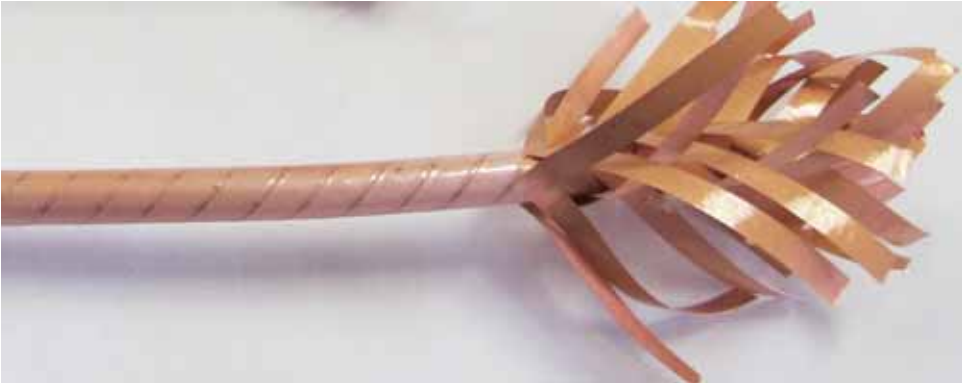
Robinson Research Institute - Victoria University of Wellingtonの臨界電流データベース [WT40]

Ic_min/cm (A)		77.5K-0T	65K-1T	50K-2T	30K-3T	30K-5T	20K-7T
AMSC Amperium® Type 8502-350 coil formulation 2G-HTS®	2019		217.48	259.87	372.79	240.74	
AMSC Amperium® Type 8700 cable formulation 2G HTS	2017		235.83	286.24	402.85	269.86	293.29
AMSC Amperium® Type 8702 non-magnetic cable formulation 2G HTS	2017			259.64	367.76	249.57	270.49
Fujikura FESC 2G-HTS	2021	495.06		615.47	1488.17	1162.09	1444.89
Fujikura FYSC 2G HTS	2021	728.26	467.34	688.52	1168.97	861.23	1010.62
InnoST 1G HTS	2019		46.2	87.98	576.81	348.65	
Samri 2G HTS	2019	385.71	310.29	532.59	975.7	674.38	721.06
Shanghai Superconductor High Field Low Temperature 2G HTS	2022	578.29	316.01	514.72	1177.53	913.53	1078.22
Shanghai Superconductor Low Field High temperature 2G HTS	2022	654.406	238.202	345.022	586.221	467.243	579.05
STI Conductus® 2G HTS	2016		209.2	349.08	742.826	573.7	
SuNAM HAN4200 2G HTS	2017			137.93			
SuNAM SAN4200 2G HTS	2017		149.61	175.31	274.23	192.86	222.32
SuperOx GdBCO 2G HTS	2021	378.81	156.25	209.26	346.13	263.22	324.73
SuperOx YBCO 2G HTS	2021	509.73	340.46	640.37	1209.87	915.95	1077.43
SuperPower Advanced Pinning 2G HTS	2021	380.6	244.74	419.45	1009.5	698.62	843.89
THEVA Pro-Line 2G HTS	2019	404.58	230.37	315.26	488.04	358.84	396.43

集合導体技術

REBCO集合導体 3類型

スパイラル導体



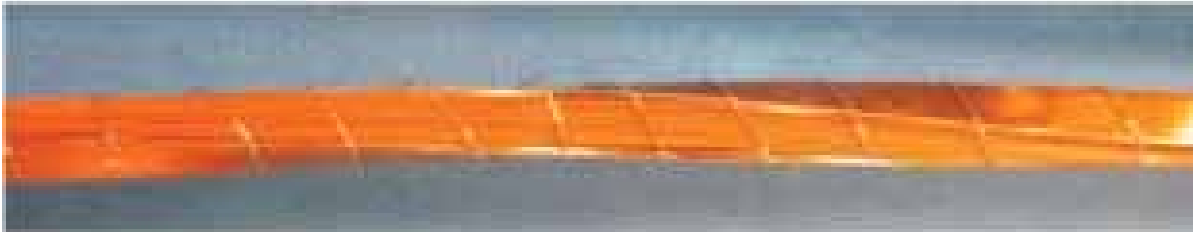
CORC® wire (Advanced Conductor Technologies)
[AC1, AC2]

Roebel (ロエベル) ケーブル



Roebel cable (VUW, KIT) [AC3]

スタック導体



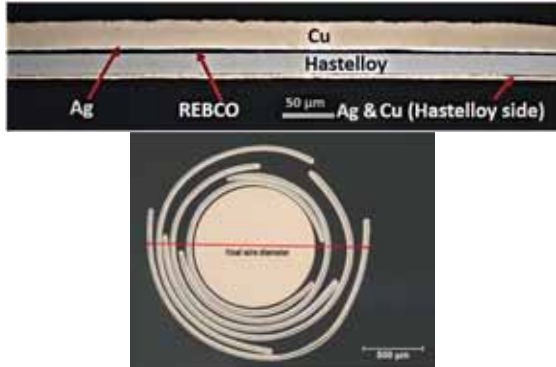
Twisted stacked-tape cable (MIT) [AC4]

図表 15

REBCO集合導体 スパイラル導体 (1) : CORC[®], STAR wire, CORT



CORC[®] wire, cable [AC2]



STAR wire [AC5]



CORT cable [AC6]

J_e 向上のためにはコア径低減が必要 →小径コアに線材を巻いた時の歪みによる I_c 低下の抑制が鍵

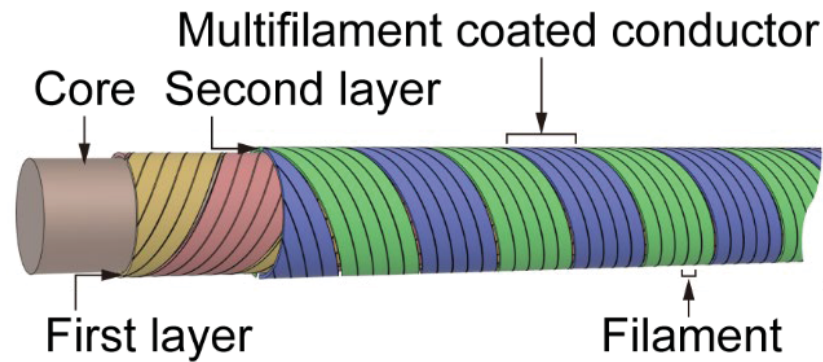
25 μm基板を使用し2 mmコアに巻いたCORC[®] wire [AC7] 超伝導層を線材厚さ中央に配置することにより1 mmコアに巻いたSTAR wire [AC5]

	CORC [®] -02
Substrate thickness	25 μm
Former OD	2.04 mm
CORC [®] wire OD	3.33 mm
Number of layers	16
Measured I_c at 12 T, 4.2 K	6.231 kA
Measured J_e at 12 T, 4.2 K	678 A/mm ²

	STAR Wire-2
Former OD	1.02 mm
STAR wire OD	1.66 mm
Number of layers	6
Measured J_e at 10 T, 4.2 K	613 A/mm ²
Measured J_e at 15 T, 4.2 K	454 A/mm ²

REBCO集合導体 スパイラル導体 (2) : SCSCケーブル

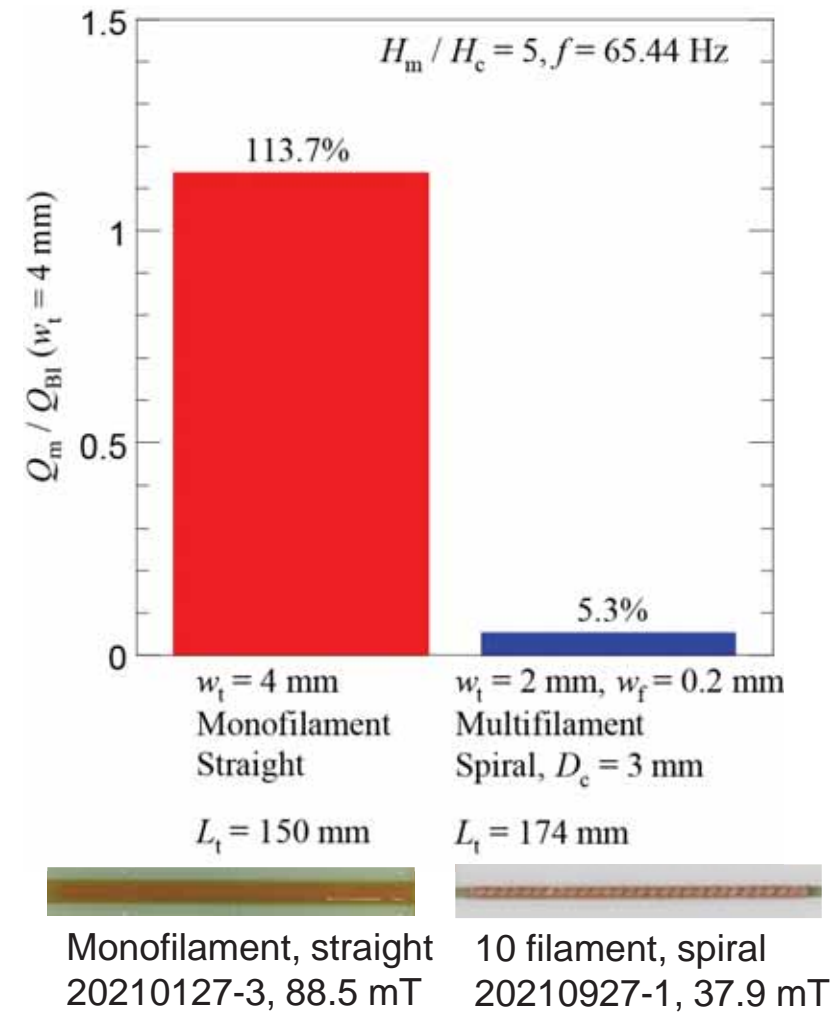
低交流損失・高磁界精度



SCSCケーブルの概念図 [AC8]



SCSCケーブルの外観 [AC10]

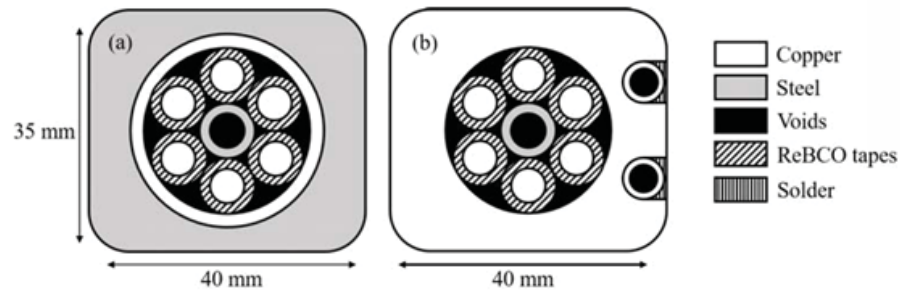


モノフィラメント線比20分の1の磁化損失 [AC9]

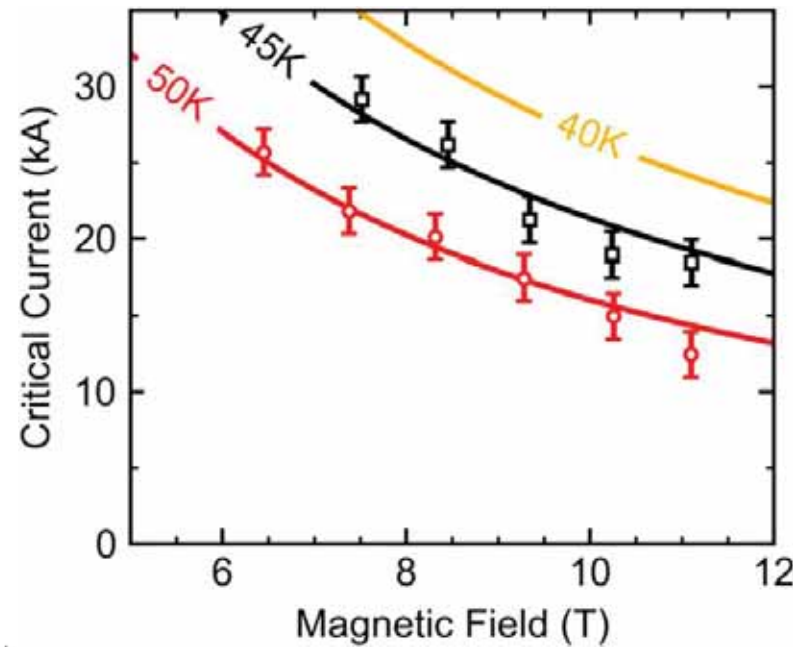
REBCO集合導体 スパイラル導体 (3) : CORC[®]-CICC



6-around-1 CORC[®]-CICC [AC11]



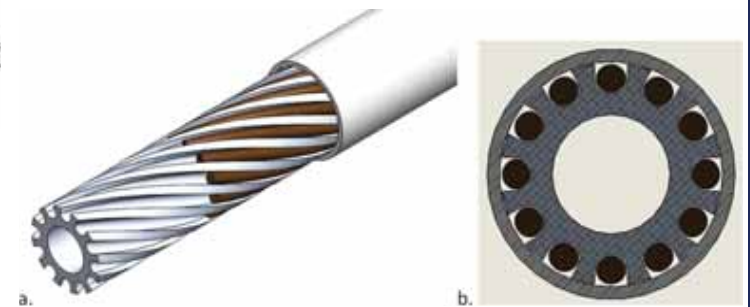
CORC[®]-CICC manufactured at CERN for fusion magnets, and rated for 80 kA at 12T/4K [AC12]



Measured $I_c - B$ of the fusion CORC[®]-CICC [AC13]

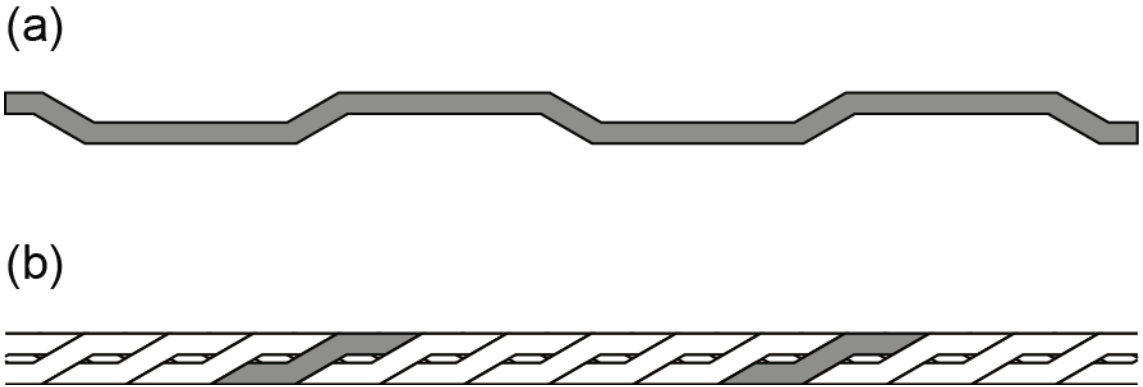


Model CORC[®]-CICC made with copper strands [AC1]



CORC[®]-CICC with extruded structure [AC1]

REBCO集合導体 Roebel (ロエベル) ケーブル



素線 (Roebel bar) (a)と組み合わせたRoebel cable (b)

Roebel cableの写真 [AC3]

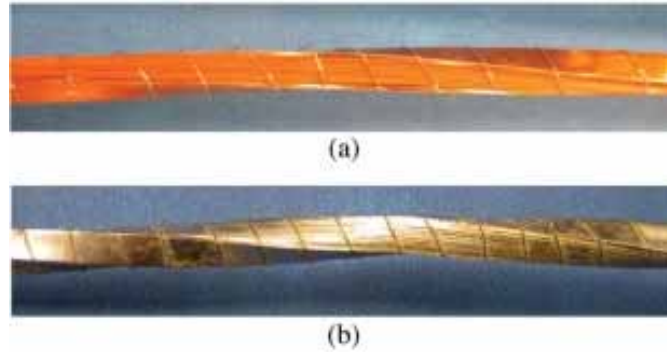
Rutherford Cable



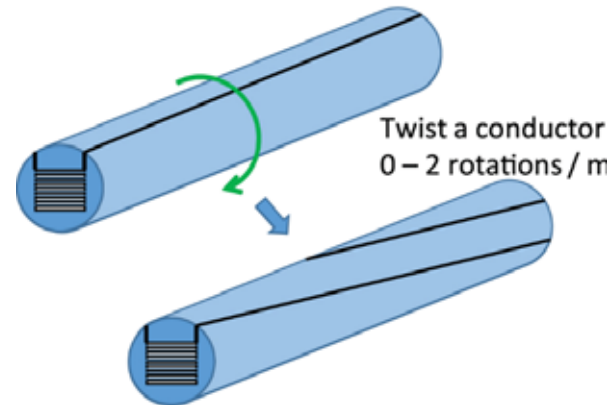
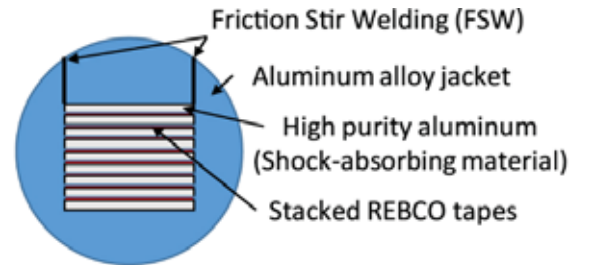
CCRC(Coated Conductor Rutherford Cable) [AC16] :
ロエベルケーブルをサブケーブルとしたラザフォードケーブルの概念図

その他Roebelケーブル参考文献」 [AC14, AC15]

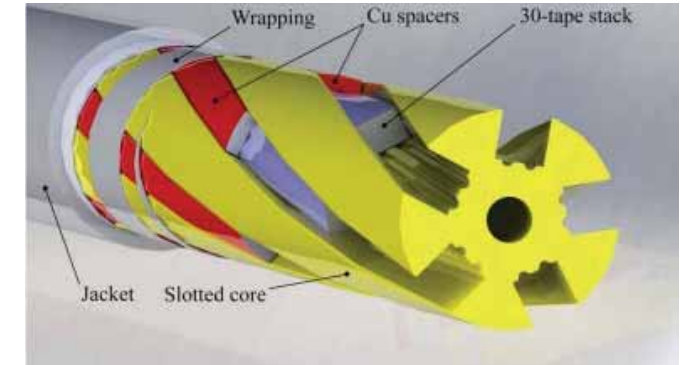
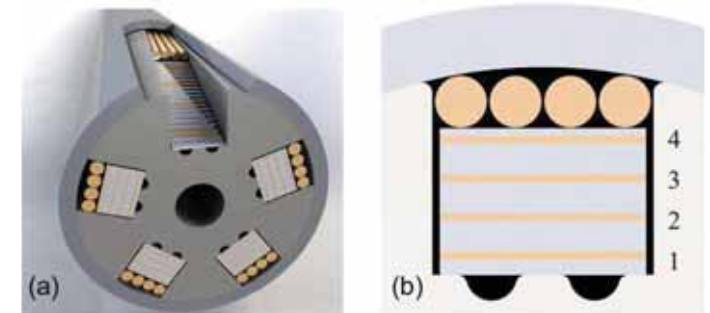
REBCO集合導体 スタック導体（1）：よりあり



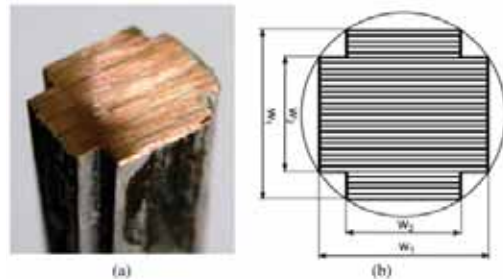
Twisted stacked-tape cable (MIT) [AC4]



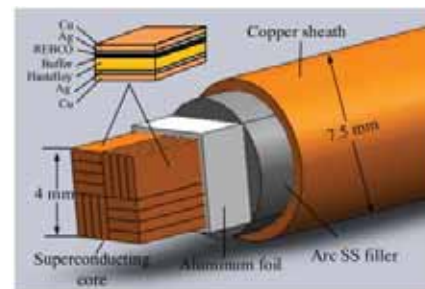
FAIR conductor [AC19]



Twisted stack HTS CICC, ENEA[AC20]



CroCo [AC17]



Q-IS conductor [AC18]

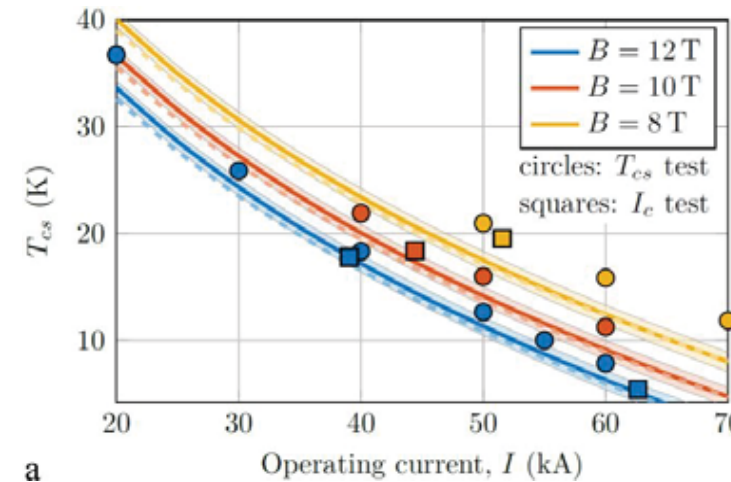
図表 20

REBCO集合導体 スタック導体 (2) : よりあり

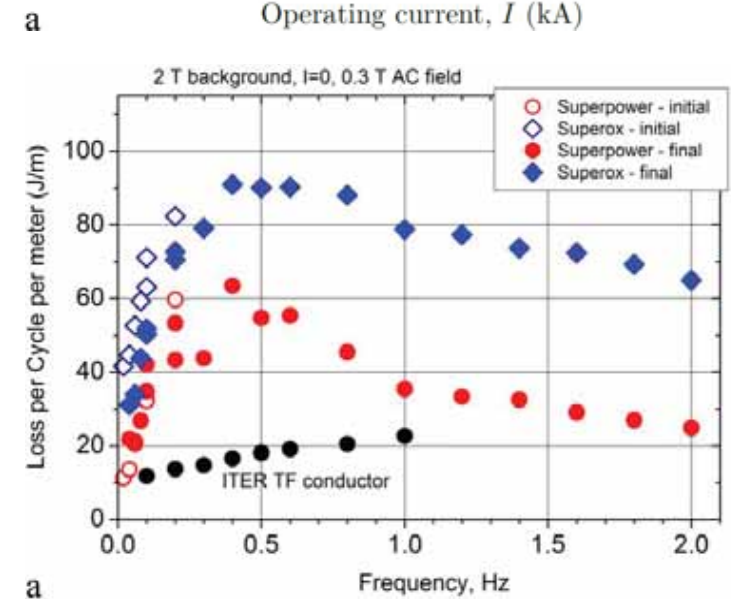
60 kA Flat REBCO CICC [AC21]



	HTS		ITER TF (Nb ₃ Sn)
Total cross section without jacket	1250 mm ²		1250 mm ²
Operating current	50 kA	30 kA	68 kA
Operating field	12 T	12 T	11.1 T
Current sharing temperature at operating condition	8 K	21 K	6.1 – 7.5 K
Operating current density (non-Cu)	500 A/mm ²	300 A/mm ²	280 A/mm ²



分流開始温度 (SuperPower 線材使用導体)

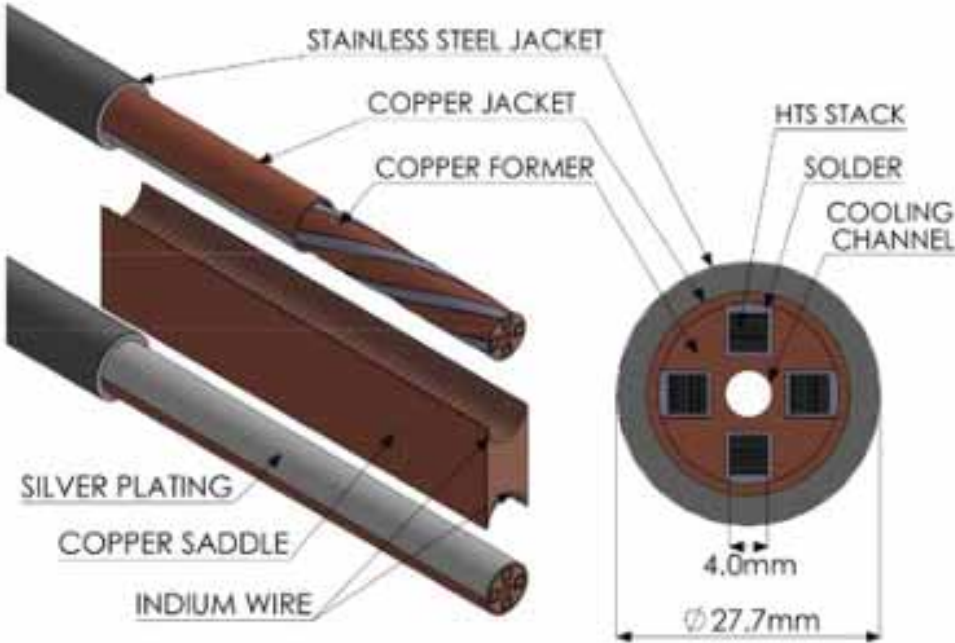


交流損失 (2 T バックグラウンド、交流磁界振幅0.3 T)

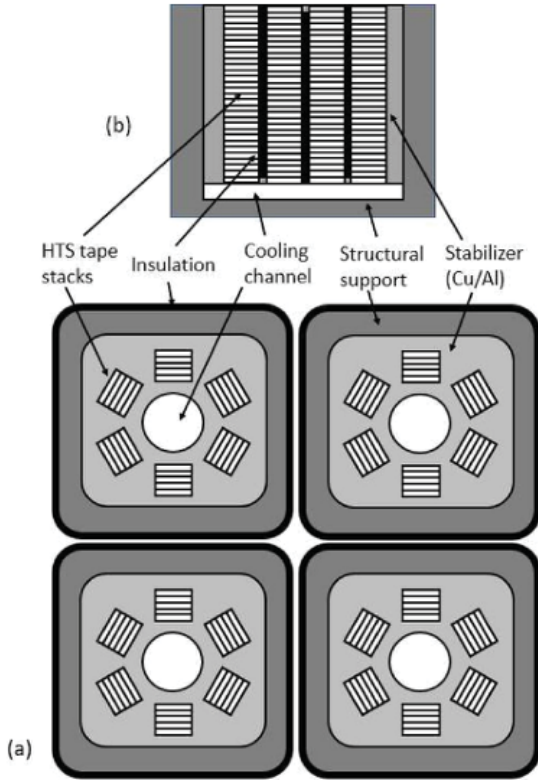
図表 21

REBCO集合導体 スタック導体 (3) : よりあり

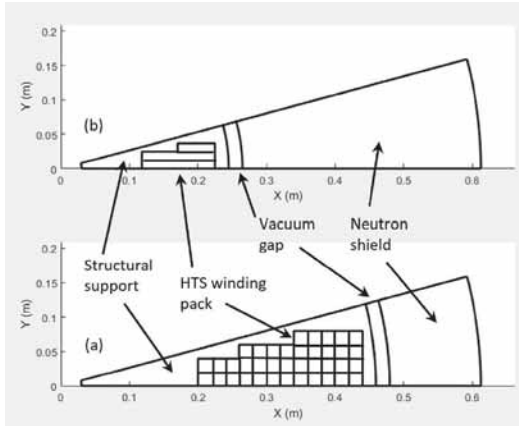
MIT, Tokamak Energy



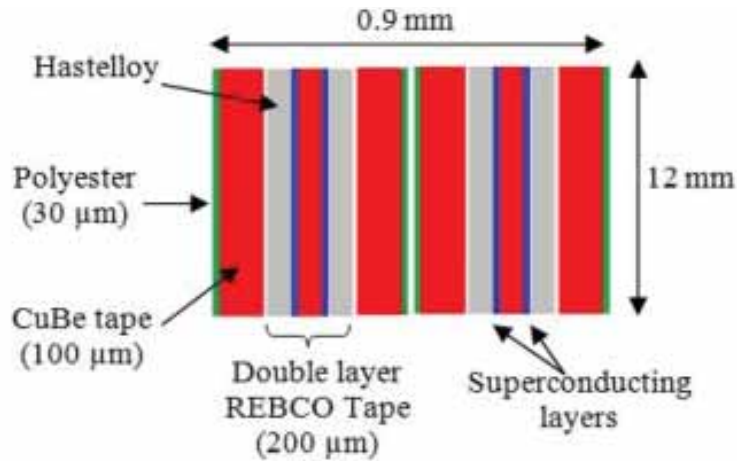
Vacuum pressure impregnated, insulated, partially transposed, extruded, and roll-formed (VIPER) cable, MIT [AC22]



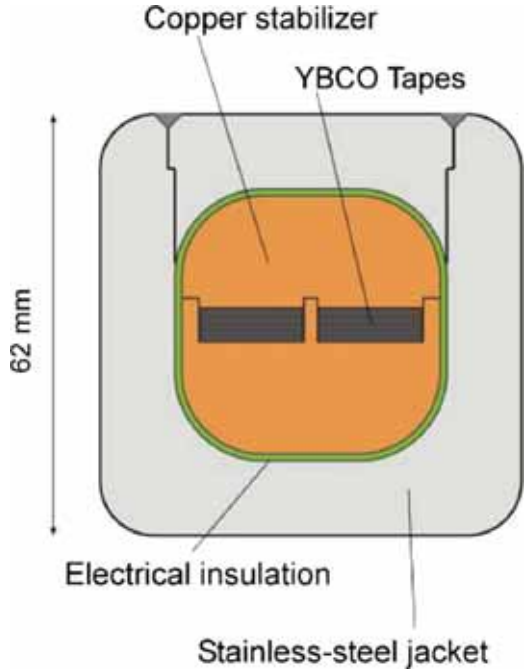
Pancakes and CICC for center column cross-section layouts of one half of one TF limb of a 1.4 m major radius 12-limb, 4 T ST with a net energy gain (Tokamak Energy) [AC23]



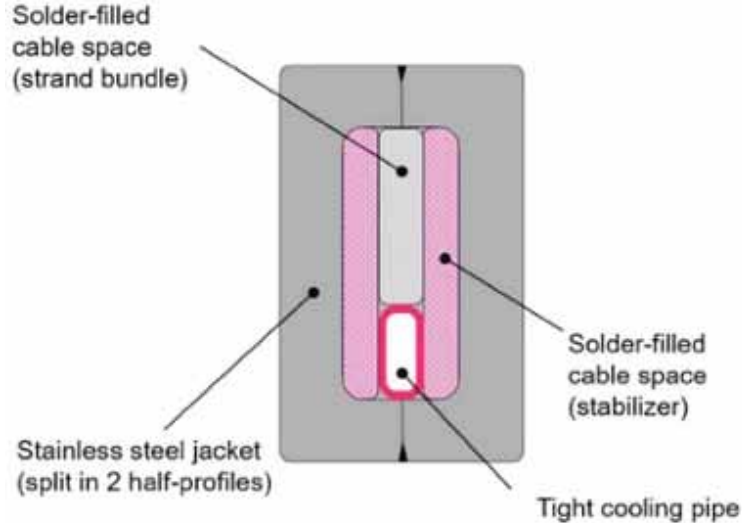
REBCO集合導体 スタック導体（4）：よりなし



EuCARD insert cable, CEA [AC24]



STARS conductor [AC25]



A CS conductor design for DEMO [AC26]

図表 23

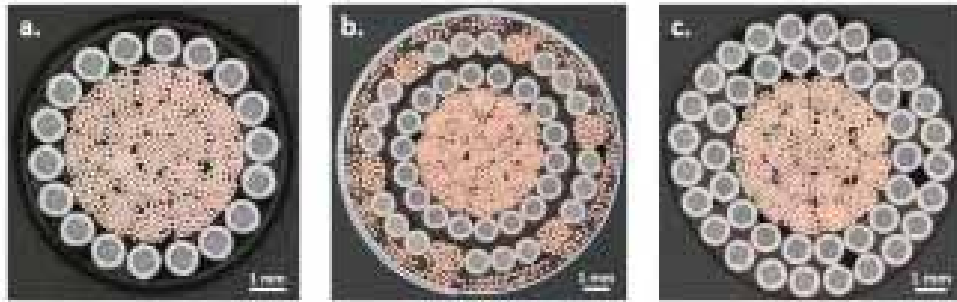
REBCO集合導体 3類型の比較

	スパイラル導体	Roebelケーブル	スタック導体
導体の断面形状 (1次導体)	円	四角 (高アスペクト比)	四角 (低アスペクト比)
曲げの自由度 (1次導体)	高 (任意方向曲げ可能)	中 (一方向曲げ可能)	低
機械的強度の確保方法 (最終導体)	ケーブル・イン・コンジット	板状コアの周囲に1次導体をより線 (CCRC)	1次導体を構造部材のスロットに挿入・複合
導体電流密度 (1次導体)	(少数層導体) 低 (多層大電流導体) 高	高 集合化したCCRCは低	高
1次導体 (素線束) のより (外部磁界に対する素線間の結合防止)	短ピッチ (数ミリ)	中ピッチ (数十ミリ)	長ピッチ (数百ミリ) or よりなし
素線 (フィラメント束) のより (外部磁界に対するフィラメント間の結合防止)	SCSCケーブル: 短ピッチ (数ミリ~数十ミリ)	なし (CRCCでは長ピッチ)	長ピッチ (数百ミリ) or よりなし
1次導体内の素線転位 (均流化)	なし	あり	なし
多重集合化	可能	難 (不可能ではない)	可能
実績	<ul style="list-style-type: none"> •より線機による長尺導体製造 (CORC®導体) •1次導体によるコイル製作 •CICC製作 (CERN) 	<ul style="list-style-type: none"> •1次導体によるコイル製作 (変圧器など、VUW) •CCRCは概念のみ 	<ul style="list-style-type: none"> •複数機関による2次導体製作例 •大型 (小中コイルに不適) •核融合向けが多

MgB₂集合導体

Cable for SC Links

[AC28]



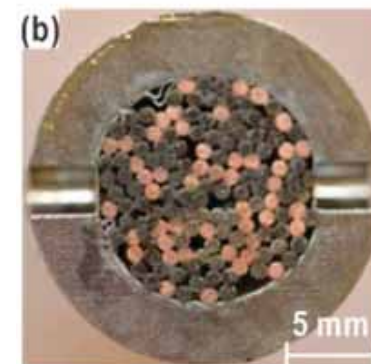
Rutherford cable

[AC29]



CICC

[AC30]

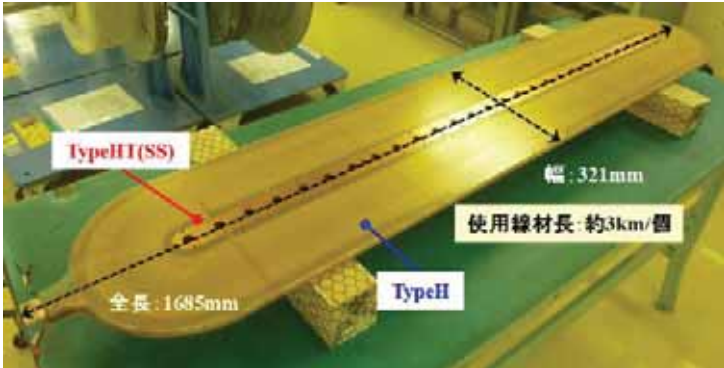


コイル技術

図表 26

コイル技術：単線で巻いたコイル（1）

レーストラックコイル
(Bi2223) [CO1]



レーストラックコイル
(REBCO) [CO2]



レーストラックコイル
(MgB₂) [CO3]

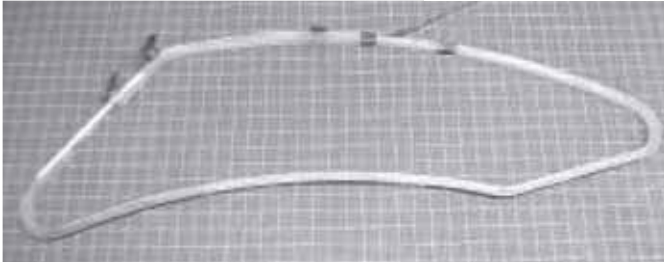
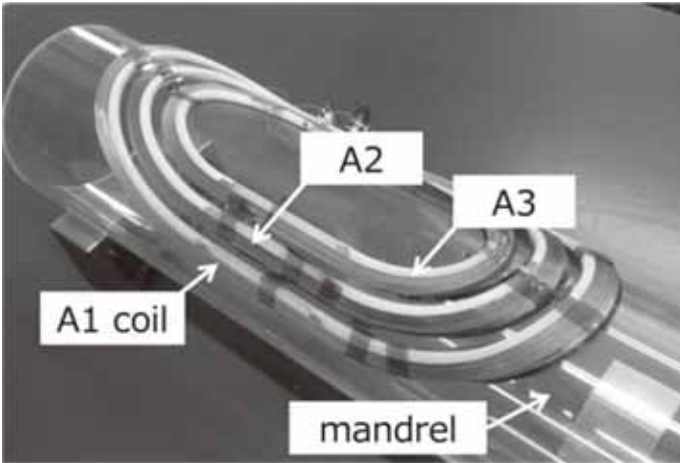


コイル技術：単線で巻いたコイル（2）

レイヤー巻きコイル
(REBCO) [C04]



立体形状コイル・負曲率コイル
(REBCO) [C05, C06, C02]

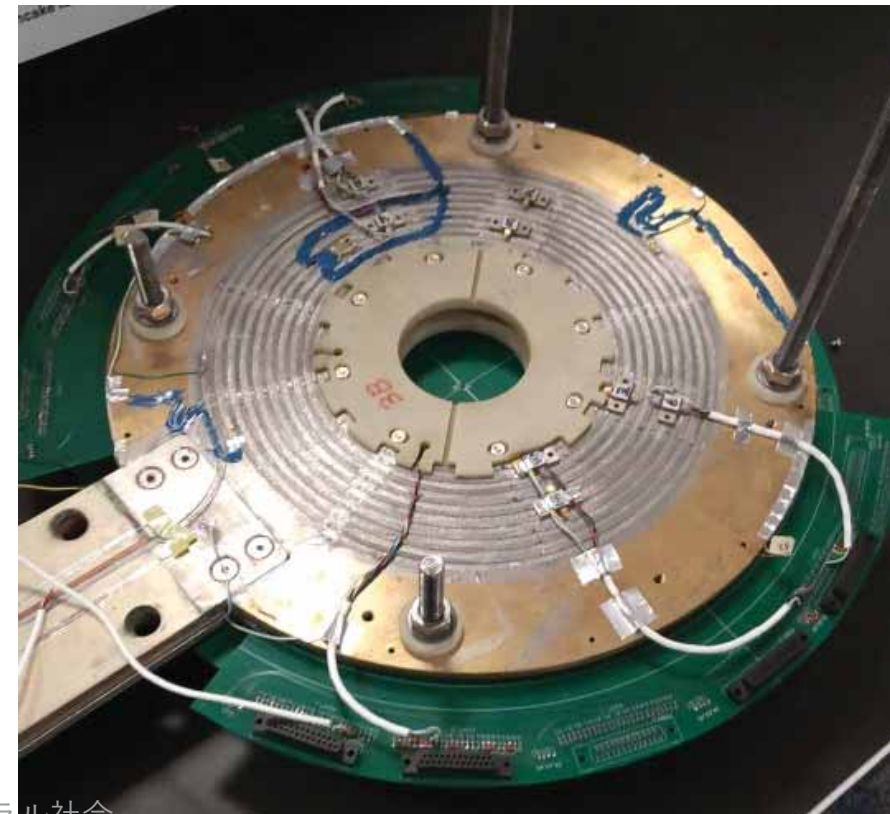


コイル技術：CORC[®]導体、積層テープで巻いたコイル

CORC[®]導体で巻いたCanted cosine thetaマグネット (LBL) [C07]

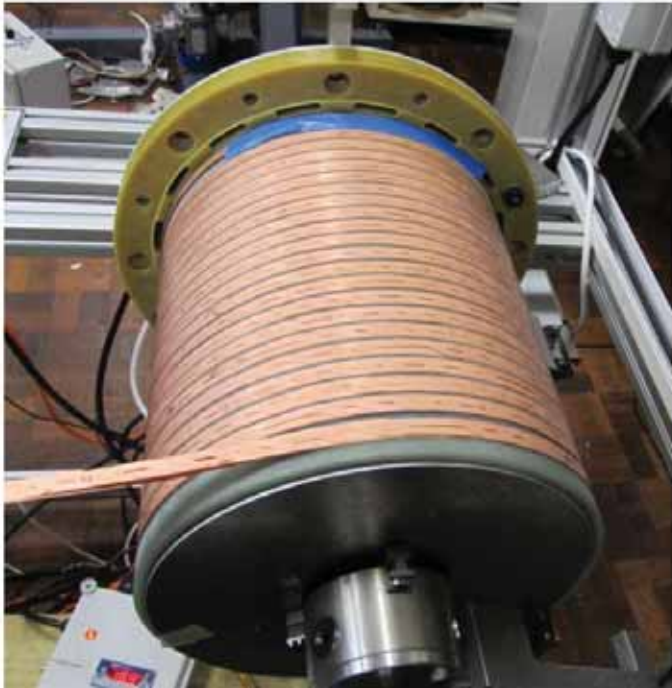


REBCO薄膜テープ線材を積層した不完全絶縁ダブルパンケーキコイル (MIT) [C08]

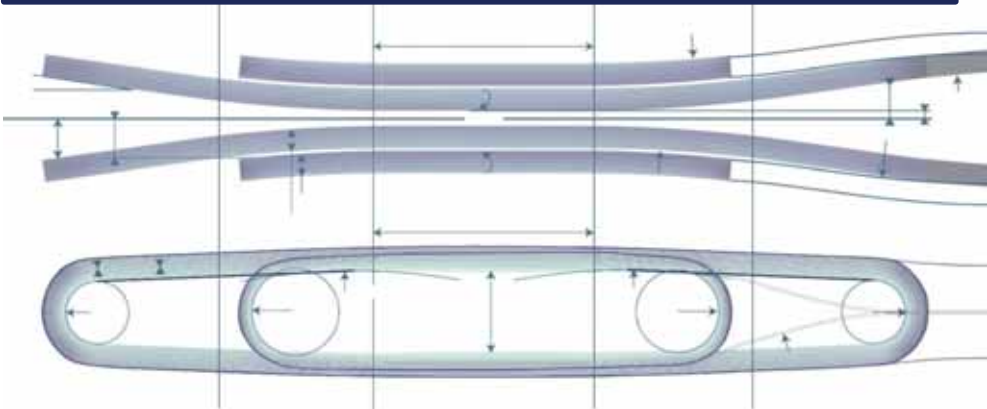


コイル技術：Roebelケーブルで巻いたコイル

レイヤー巻きソレノイドコイル (VUW) [CO9]



Aligned block (整列ブロック) コイル (CERN) [CO10]



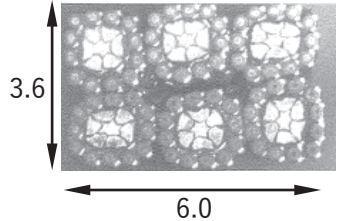
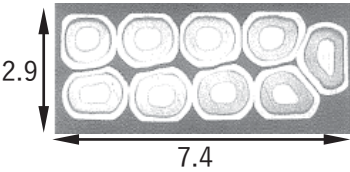
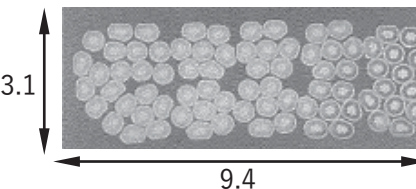
超電導導体概念設計：
Super-GM発電機界磁巻線用導体を対象として

Super-GMの70 MW機の界磁巻線用導体のHTS版の設計

- 運転温度は20 Kないし、それ以上を想定する。
- Super-GMの低速応A機（高安定導体型）・低速応B機（高電流密度導体型）・超速応機の導体のHTS版を設計する。
- なんらかの具体的な集合導体方式を想定する。
- 導体電流密度は、Super-GM機と同程度とする。
- 可能な限り、導体電流もSuper-GM機と同程度とする。
- 公知の現在の線材技術水準に準拠する（組み合わせは許容）。

Super-GM界磁巻線用NbTi集合導体の諸元 [CD1]

図表 32

	低速応型A機（高安定）	低速応型B機（高電流密度）	超速応型機
界磁電流連続定格値	3000 A	3000 A	3200 A
界磁電流最大値	3600 A	3600 A	4500 A
界磁巻線最大磁場	4.8 T	6.5 T	6.75 T
運転温度	4.2 K	4.2 K	4.2 K
導体断面	6 mm × 3.6 mm	7.4 mm × 2.9 mm	9.4 mm × 3.1 mm
導体断面積	21.6 mm ²	21.46 mm ²	29.14 mm ²
導体電流密度	139 A/mm ²	140 A/mm ²	110 A/mm ²
導体臨界電流	8.5 kA@4 T, 5.5 kA@7 T	10.5 kA@5 T, 6.3 kA@7 T	18.7 kA@4 T, 15.8 kA@5 T, 12.8 kA@6 T
導体形状			
線材形状	0.39 mm φ, $d_f = 9.7 \mu\text{m}$	1.61 mm φ, $d_f = 8.8 \mu\text{m}$	0.59 mm φ, $d_f = 3.5 \mu\text{m}$
線材数	12 × 6（写真から）	9	7 × 11
* 導体電流密度は界磁電流連続定格値に対する値、導体断面は絶縁なしの状態			

低速応型A機用導体の設計 (20 K運転)

図表 33

	Super-GM LTS	REBCO CORC®型	REBCO SCSC	REBCO Roebel	MgB ₂ 低磁界部のみ
界磁電流連続定格値	3000 A	3900 A	3000 A	3000 A	3000 A
界磁電流最大値	3600 A	4600 A	3600 A	3600 A	3600 A
界磁巻線最大磁場	4.8 T	4.8 T	4.8 T	4.8 T	4.8 T
運転温度	4.2 K	20 K	20 K	20 K	20 K
導体種類	矩形導体	CORC®型ケーブル	SCSCケーブル	Roebelケーブル	矩形導体
導体形状	6 mm × 3.6 mm	コア直径5.2 mm 外直径5.95 mm 層数5	コア直径3.8 mm 外直径5.2 mm 層数9	12 mm × 0.6 mm (線材間の隙間無視)	6 mm × 3.6 mm
導体断面積	21.6 mm ²	27.8 mm ²	21.12 mm ²	7.2 mm ²	21.6 mm ²
導体電流密度	139 A/mm ²	139 A/mm ²	142 A/mm ²	416.7 A/mm ²	139 A/mm ²
導体臨界電流	8.5 kA@4 T, 5.5 kA@7 T	9750 A@5 T	7054 A@4.8 T	9000 A@4 T	5334 A@2 T
線材形状	0.39 mm φ $d_f = 9.7 \mu\text{m}$	4 mm × 0.11 mm モノフィラメント	2 mm × 0.057 mm $w_f \sim 200 \mu\text{m}$	6 mm × 0.1 mmジ グザグ, モノフィラメント	0.6 mm φ $d_f = 100 \mu\text{m}$
線材数	72	15	41	12	42
備考		外直径は0.1 mmの絶縁含む	Striationにより Ic75%に低下	線材間の隙間無視 集合化Ic低下考慮	ハイブリッド巻線の2 T以下を分担

* 導体電流密度は界磁電流連続定格値に対する値、導体断面は絶縁なしの状態

低速応型B機用導体の設計 (20 K運転)

図表 34

	Super-GM LTS	REBCO CORC®型	REBCO SCSC	REBCO Roebel	MgB ₂ 低磁界部のみ
界磁電流連続定格値	3000 A	4200 A	3000 A	3000 A	3000 A
界磁電流最大値	3600 A	5000 A	3600 A	3600 A	3600 A
界磁巻線最大磁場	6.5 T	6.5 T	6.5 T	6.5 T	6.5 T
運転温度	4.2 K	20 K	20 K	20 K	20 K
導体種類	矩形導体	CORC®型ケーブル	SCSCケーブル	Roebelケーブル	矩形導体
導体形状	7.4 mm × 2.9 mm	コア直径5.2 mm 外直径6.17 mm 層数7	コア直径3 mm 外直径5 mm 層数13	12 mm × 1 mm (線材間の隙間無視)	2.9 mm × 7.4 mm
導体断面積	21.46 mm ²	29.9 mm ²	19.65 mm ²	12 mm ²	21.46 mm ²
導体電流密度	140 A/mm ²	140 A/mm ²	153 A/mm ²	250 A/mm ²	140 A/mm ²
導体臨界電流	10.5 kA@5 T, 6.3 kA@7 T	11130 A@7 T	6908 A@6.5 T	9600 A@7 T	5490 A@2.5 T
線材形状	1.61 mm φ $d_f = 8.8 \mu\text{m}$	4 mm × 0.11 mm モノフィラメント	2 mm × 0.057 mm $w_f \sim 200 \mu\text{m}$	6 mm × 0.1 mmジ グザグ, モノフィラメント	1.61 mm φ $d_f = 250 \mu\text{m}$
線材数	9	21	51	20	9
備考		外直径は0.1 mmの絶縁含む	StriationによりI _c 75%に低下	集合化I _c 低下考慮	ハイブリッド巻線の2.5 T以下を分担

* 導体電流密度は界磁電流連続定格値に対する値、導体断面は絶縁なしの状態

超速応型機用導体の設計 (20 K運転)

図表 35

	Super-GM LTS	REBCO CORC®型	REBCO SCSC	REBCO Roebel	MgB ₂ 低磁界部のみ
界磁電流連続定格値	3200 A	2970 A	3200 A		3200 A
界磁電流最大値	4500 A	4177 A	4500 A		4500 A
界磁巻線最大磁場	6.75 T	6.75 T	6.75 T		6.75 T
運転温度	4.2 K	20 K	20 K		20 K
導体種類	矩形導体	CORC®型ケーブル	SCSCケーブル		矩形導体
導体形状	9.4 mm × 3.1 mm	コア直径5.2 mm 外直径6.39 mm 層数9	コア直径4 mm 外直径6 mm 層数13		9.4 mm × 3.1 mm
導体断面積	29.14 mm ²	32.1 mm ²	28.29 mm ²		29.14 mm ²
導体電流密度	110 A/mm ²	110 A/mm ²	113 A/mm ²		110 A/mm ²
導体臨界電流	18.7 kA@4 T, 15.8 kA@5 T, 12.8 kA@6 T	14310 A@7 T	8682 A@6.75 T		5830 A@2.5 T
線材形状	0.59 mm φ $d_f = 3.5 \mu\text{m}$	4 mm × 0.11 mm モノフィラメント	2 mm × 0.057 mm $w_f \sim 200 \mu\text{m}$		1.5 mm φ $d_f = 237 \mu\text{m}$
線材数	77	27	66		
備考		外直径は0.1 mmt の絶縁含む	Striationにより Ic75%に低下		ハイブリッド巻線の 2.5 T以下を分担

* 導体電流密度は界磁電流連続定格値に対する値、導体断面は絶縁なしの状態

40 K運転用REBCO導体（SCSCケーブル）の設計

図表 36

	低速応型A機（高安定）	低速応型B機（高電流密度）	超速応型機
界磁電流連続定格値	3000 A	6000 A	3200 A
界磁電流最大値	3600 A	7200 A	4500 A
界磁巻線最大磁場	4.8 T	6.5 T	6.75 T
運転温度	40 K	40 K	40 K
導体種類	SCSCケーブル	SCSCケーブル	SCSCケーブル
導体形状	コア直径3 mm 外直径5.3 mm 層数15	コア直径3 mm 外直径7.3 mm 層数28	コア直径3 mm 外直径6 mm 層数20
導体断面積	22.15 mm ²	41.99 mm ²	29.03 mm ²
導体電流密度	135 A/mm ²	143 A/mm ²	110 A/mm ²
導体臨界電流	3953 A@4.8 T	7850 A@6.5 T	4750 A@6.75 T
線材形状	2 mm × 0.057 mm $w_f \sim 200 \mu\text{m}$	2 mm × 0.057 mm $w_f \sim 200 \mu\text{m}$	2 mm × 0.057 mm $w_f \sim 200 \mu\text{m}$
線材数	61	147	91
備考	StriationによりIc75%に低下	StriationによりIc75%に低下	StriationによりIc75%に低下
* 導体電流密度は界磁電流連続定格値に対する値、導体断面は絶縁なしの状態			

冷却技術

冷却技術：HTSコイルの冷却技術の概観（1）

図表 38

文献	方式	想定機器	導体	冷媒	温度	冷凍能力	冷凍機	その他	代表図
[CR1]	伝導冷却	MRI	REBCO	なし	5K	—	2段GM：2台	熱スイッチにより予冷時間の短縮	
[CR2]	伝導冷却	MRI	BSCCO	なし	20K	4W	2段GM：1台		
[CR3]	サーモサイフォン	MRI	BSSCO	Ne液体	27K	18W	RD400：1台		
[CR4]	固体窒素	MRI	MgB ₂	N ₂ 固体	10K	8W	2段GM：1台	SN2の高熱容量を利用	
[CR5]	ヒートパイプ	MRI	BSSCO	Ne液体	30K	50W	1段GM：1台	SUSヒートパイプ	
[CR6]	液体水素	モータ	なし	H ₂ 液体	20K	—	なし	1800rpmで液面を維持	

冷却技術：HTSコイルの冷却技術の概観（2）

図表 39

文献	方式	想定機器	導体	冷媒	温度	冷凍能力	冷凍機	その他	代表図
[CR7]	循環冷却	モータ	—	He ガス	—	—	GM：4台?		
[CR8]	循環冷却	モータ	—	N ₂ 液体	65K	330W	1段GM：1台		
[CR9]	循環冷却	変圧器	REBCO	N ₂ /Ne 液体	65K	2kW	ターボブレイトン	冷却流体とサブクールLN ₂ の熱交換	
[CR10]	循環冷却	変圧器	—	N ₂ 液体	64K	290W	1段GM2台	サブクールLN ₂ 循環	
[CR11]	循環冷却	ケーブル	—	N ₂ 液体	77K	4kW	スターリング：8台		
[CR12]	循環冷却	強磁場磁石	REBCO	He ガス	10K	8W	2段GM2台	LTS用にGM-JT：2台 シールド用に1段GM：2台	

冷却技術：HTSコイルの冷却技術の概観（3）

図表 40

	方式	想定機器	導体	冷媒	温度	冷凍能力	冷凍機	その他	代表図
[CR13]	サーモサイフォン	船舶用回転機	BSSCO	Ne液体	29.6K	183W	RDK-500B：2台	界磁のみ冷却 極低温継手	
[CR14]	サーモサイフォン	SMES	MgB2	H ₂ 液体	-	-	-	3DPコイル(モデルコイル)の冷却試験	
[CR15]	磁気冷凍	HTS	HTS	-	-	-	-	磁気シールドで高温超伝導コイルの磁場を制御	

図表 41

冷却技術：HTS用に用いられる小型冷凍機 [CR16-18]

メーカー	タイプ	能力	最低温度	MTBR(hours)
Cryomech	GM type	600W@80K	26K	15,000
Cryomech	PTR	100W@80K	9K	25,000
Sumitomo	GM	200W@80K	20K	15,000
Leybold/Oerl.	GM	140W@80K	18K	n.a.
Chart/Qdrive	Stirling	Up to 1kW@80K	40K limit	129,760
Creare ⁺	Stirling	> 1kW@80K	(tbd.)	180,000 (small)
STI*	Stirling	Up to 100W@80K	45K	>1 000,000
Sunpower	Stirling PTR	Up to 16W@80K	40 K limit	>1 000,000
Stirling SV	Stirling	Up to 1.3kW@80K	38K	n.a.
Linde	Rev Brayton	0.9kW@20K ^{\$}	n.a.	n.a.
Air Liquide	Turbo Brayton	50kW and higher	35K	n.a.
大陽日酸	Turbo Brayton	10kW@70K	70K	n.a.
前川製作所	Turbo Brayton	5kW@65K	65K	n.a.

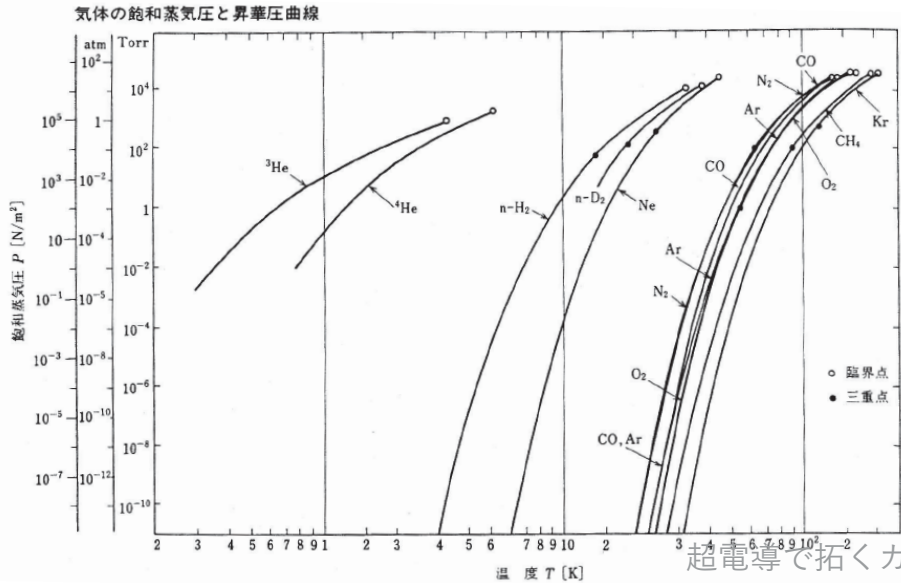
*design study, +under development, \$with LN₂ precool 超電導で拓くカーボンニュートラル社会

W Stautner IWC-HTS, 10/14-16/2015, Matsue, Japan
大陽日酸ウェブサイト、前川製作所ウェブサイト

図表 42

冷却技術：冷媒の比較

	沸点@1atm [K]	臨界点 [K] / [MPa]	密度 [kg/m ³]	潜熱 [kg/kJ]	粘性係数 [μPa · s]	比熱 [kJ/kg/K]
GHe	4.2	5.2 / 0.2	16	21	1.2	5.2
LH ₂	20.4	33 / 1.3	71	445	13.2	9.7
LNe	27.1	44 / 2.7	1205	86	124.0	1.9
LN ₂	77.3	126 / 3.4	807	199	149.9	2.0
LNG	112	191 / 4.6	422	509	116.5	3.5



超臨界ヘリウム または
加圧・サブクール液体の利用 [CR19]

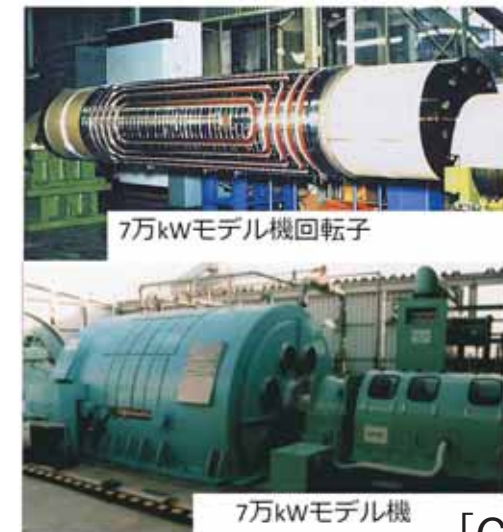
冷却技術：Super-GM発電機の冷却技術（1）

Super-GM 超電導発電機開発概要

- 通商産業省工業技術院ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術」プロジェクトの一環として、第Iフェーズ（1988-1999）では200MW級パイロット機を目指した70MW級モデル機の開発を実施
- 世界で初めて、7万V実系統に連系して安定な運転特性を実証
- 金属系導体・酸化物系線材、パイロット機的设计製作に必要な各種要素技術、試験・運用技術、高信頼度冷凍システムの開発、等を行い、多くの成果を挙げた
- 第IIフェーズ（2000-2004）では、コスト低減のための高密度化、大容量化の基盤技術を開発

プロジェクトの成果（第Iフェーズ）

- ① 世界最高レベルの金属系発電機用導体、および電力応用に適した酸化物薄膜テープ線材を開発
- ② 世界最大出力79.7MWの発生に成功
- ③ 200MW級換算で発電機効率99.3%となり現用機に比べて約0.5%の効率改善が可能
- ④ 連続出力時間814時間、DSS（深夜起動停止）運転44回を含めた世界最長の連続運転時間1,500時間を達成
- ⑤ 実系統試験を実施

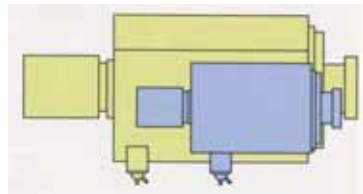
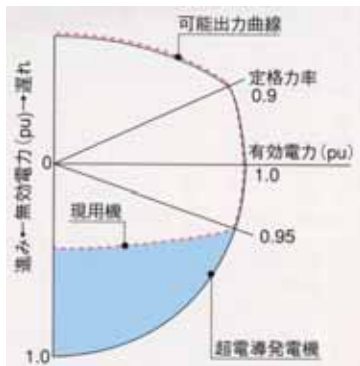


冷却技術：Super-GM発電機の冷却技術（2）

Super-GM 超電導発電機主要スペック・開発目標

現用機との構造比較 [CR20]

回転子	界磁巻線	種類	超電導発電機	現用発電機
		冷却媒体 (温度)	超電導媒体	液体ヘリウム (-269℃)
回転子軸	材料	種類	非磁性鋼	磁性鋼
		構造	多重円筒真空断熱構造	単一軸構造
固定子	電機子巻線	種類	常電導媒体 (鋼材)	常電導媒体 (鋼材)
		冷却媒体	水	水
		巻線方式	空隙巻線	鉄心スロット内巻線
	電機子巻線の外周	磁気シールド (積層珪素鋼板)	鉄心 (積層珪素鋼板)	



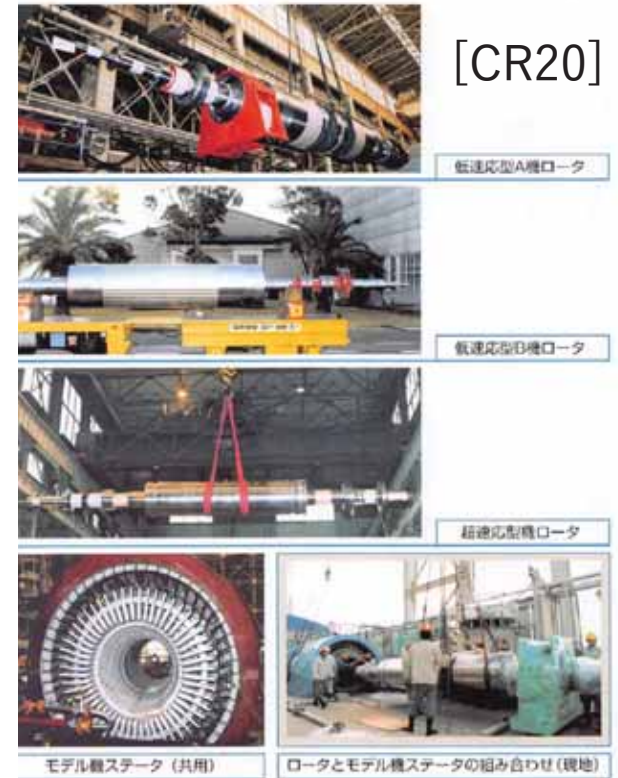
70MW級モデル機の仕様 [CR21]

●表 3.1 7万kW級モデル機の仕様

仕様	低速応型モデル機		超高速型モデル機
	高安定導体 (低速応型A機)	高電流密度導体 (低速応型B機)	低損失導体 (超高速型機)
出力 [kW]	7万kW級	7万kW級	7万kW級
容量 [kVA]	83	83	73
電圧 [kV]	10	10	10
電流 [A]	4 792	4 792	4 215
力率	0.9	0.9	0.9
極数	2	2	2
回転速度 [min ⁻¹]	3 600	3 600	3 600
同期リアクタンス [p.u.]	0.35	0.35	0.45
界磁電流 定格 [A]	3 000	3 000	3 200
最大 [A]	3 600	3 600	4 500
界磁電流変化率 [A/s]	300	300	3 200
回転子外径 [mm]	880	890	885

●表 3.2 冷凍システムの仕様

項目	仕様
液化能力 [t/h]	100以上
連続運転時間 [h]	10 000以上
不純ガス濃度 [ppm]	0.1以下

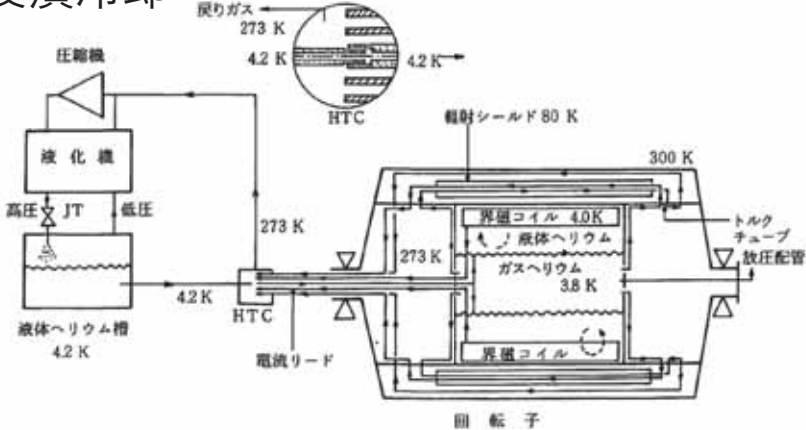


冷却技術：Super-GM発電機の冷却技術（3）

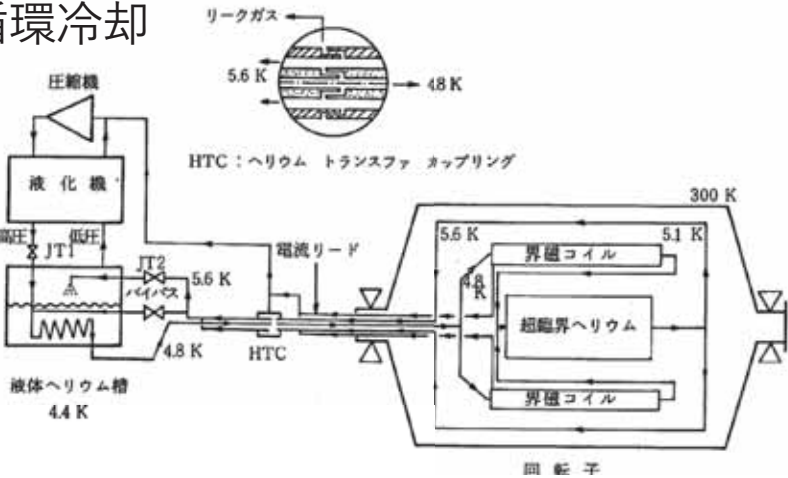
冷却方式決定の経緯

- NbTi導体の採用により、冷媒はヘリウムに限られる。
- プロジェクト開始前に、界磁巻線の冷却方式として、浸漬冷却方式と強制循環冷却方式を比較検討した。
[CR22]

浸漬冷却



強制循環冷却



蒸発潜熱による冷却	顕熱による冷却
HTC構造が簡素	HTC構造が複雑
回転子内部の冷媒循環が自然対流のため自己制御式	冷媒流量を調整可能・低速ターニングでも貯液が可能
セルフポンピング作用による温度低下	気液界面の動揺がなく回転が安定

➤ 技術的課題は解決が可能で、メリットが上回ると判断し、浸漬冷却を選択

冷却技術：Super-GM発電機の冷却技術（4）

高遠心力場における回転子内部の冷却上の特長

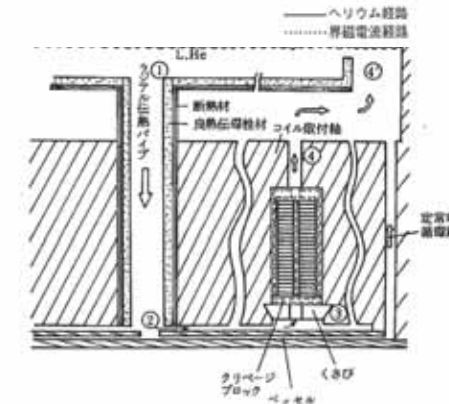
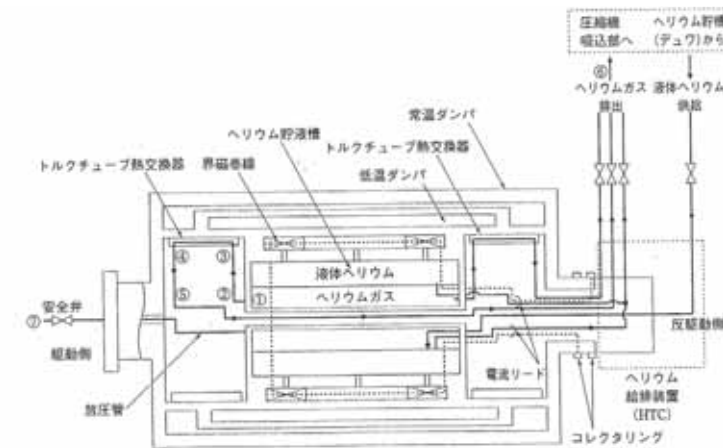
- 回転による遠心力によりヘリウムが加圧、超臨界状態に（0.228MPa）。巻線部に気泡が発生せず、電気絶縁性能に優れる
- 遠心力により自然対流熱伝達が促進（遠心力の1/3乗に比例）。強制冷却熱伝達を凌ぐ
- セルフポンピング作用により回転子中心部は大気圧以下となり、気液界面温度は3.8K程度に低下

セルフポンピング作用 [CR21]

内部ヘリウム槽からトルクチューブに向かう低温高密度ガスヘリウムと、トルクチューブに沿って流れる過程で侵入熱を吸収して高温低密度になったガスヘリウムとの、半径方向流路での遠心力差により圧力差を生じる

サーモサイフォン作用 [CR22]

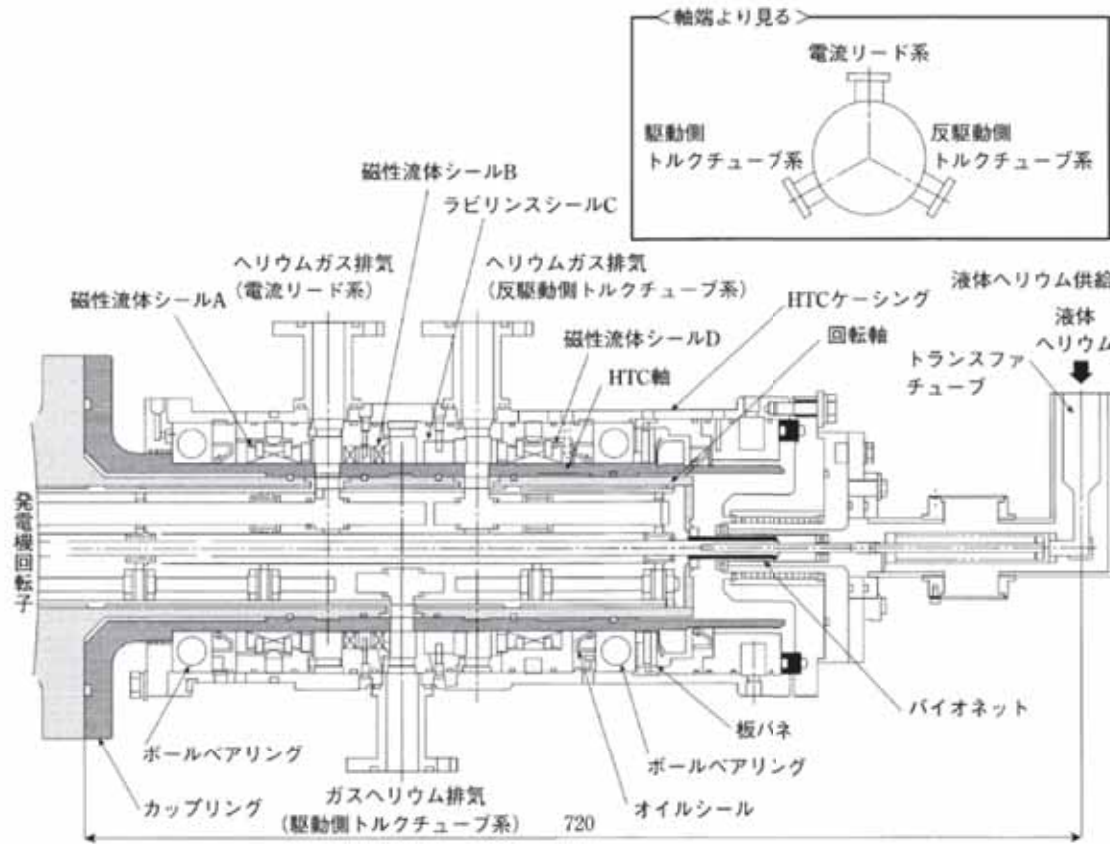
トルクチューブや界磁巻線などの回転子外径側で加熱されたヘリウムは密度が減少し、内径側に移動する。高遠心力場ではヘリウムはわずかな密度変化で対流する



冷却技術：Super-GM発電機の冷却技術（5）

冷却にかかるコンポーネント開発

ヘリウム吸排装置（HTC）・シール・軸受け [CR21]

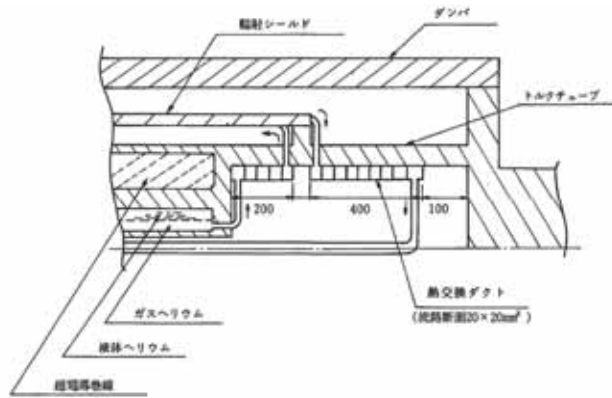


- 容易に着脱可能で分解組み立て性に優れたHTCを開発
- 高いシール性が求められる排気側は磁性流体シール、他の部分はラビリンスシール
- 室温軸受け

冷却技術：Super-GM発電機の冷却技術（6）

冷却にかかるコンポーネント開発（続）

トルクチューブ [CR22]



- 4.2K～300Kの温度勾配
- 突発短絡時の大トルクにも対応し、かつ熱侵入を抑える設計が必要
- 発電機定常時の熱付加では全体の約半分を占める

輻射シールド（低温ダンパ） [CR21]

- 低速応型A機・B機、超速応型機で、ダンパとして持たせる機能に応じて設計が異なる
- 50～150Kを維持し、輻射を抑制

定常時熱負荷（1000MW機設計） [CR22]

トルクチューブ伝導	40W
電流リード	22 @ 8 KA
輻射	3
HTC	5
その他	10
合計	80W

冷却技術：LTSにおける強制冷却技術（1）

強制冷却と浸漬冷却の比較

強制冷却

1. 被冷却物(超電導線等)の冷却方式, 浸漬冷却の対比語
2. 被冷却物の表面に沿って超臨界ヘリウム(S-He)を強制的に流し, 強制対流熱伝達で冷却する
3. 温度の上がったS-Heを冷媒出口から排出することにより除熱する
4. 適用例: JT60SA-CS, EF, ITER-TF,CS,PF, LHD-PF コイル

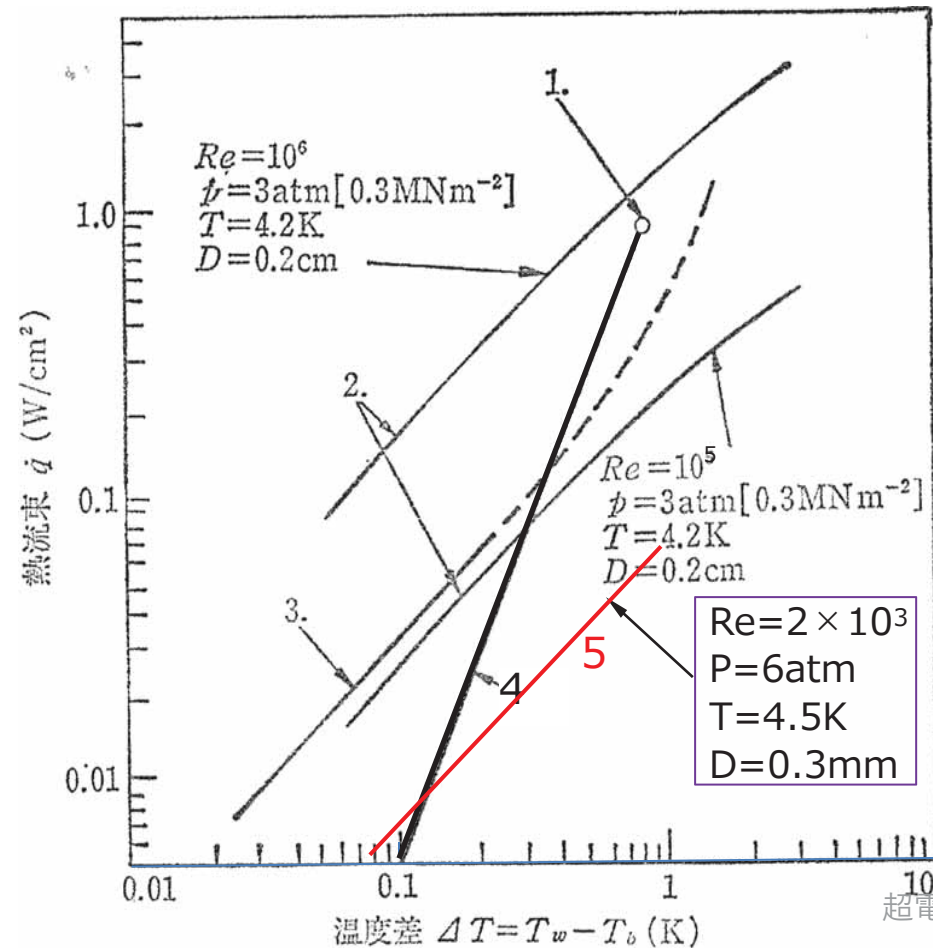
浸漬冷却

1. 被冷却物の表面を液体ヘリウム(L-He)に漬けて, 沸騰熱伝達で冷却する
2. 温度の上がったL-Heが液面から蒸発して除熱される
3. 適用例: MCZ, MRI, 磁気浮上, LHD-ヘリカルコイル

冷却技術：LTSにおける強制冷却技術（2）

S-He強制冷却熱伝達とL-He核沸騰熱伝達の比較

- ・ 流速を上げレイノルズ数を増加させればS-He強制冷却熱伝達率は増大するが、流速は圧損(入口圧力-出口圧力, ほぼ流速の二乗に比例)で制限される
- ・ ITERのS-He強制冷却熱伝達特性は温度差0.1K以下では核沸騰熱伝達と同程度



- 1.バーンアウト点
- 2.S-He強制冷却熱伝達(流速大)
- 3.銅と1.9Kの超流動He間（カピッツァ伝導）
- 4.L-He核沸騰熱伝達(1atm)
- 5.ITERのS-He強制冷却熱伝達特性

S-He強制冷却熱伝達と
L-He核沸騰熱伝達の比較
([CR23] 但し, 5.ITERの線は追記)

T_w : 被冷却体温度
 T_b : 冷媒温度
 \dot{q} 単位面積当たりの熱流束
 $\dot{q} = h(T_w - T_b)$

冷却技術：LTSにおける強制冷却技術（3）

S-HeとL-He比較

超臨界ヘリウム(S-He)

1. Heの状態図(次頁)のX+Yの領域(厳密にはXのみ)
2. 圧力は2.26atm以上, 温度は5.2K以上。但し, 5.2K以下であってもS-Heとする場合あり。
3. コイル冷却に用いる場合, 被冷却体を顕熱で冷却するため, 入熱によって温度は上がる
4. 相変化がないため, 2相流が発生しない(均一な流れ)

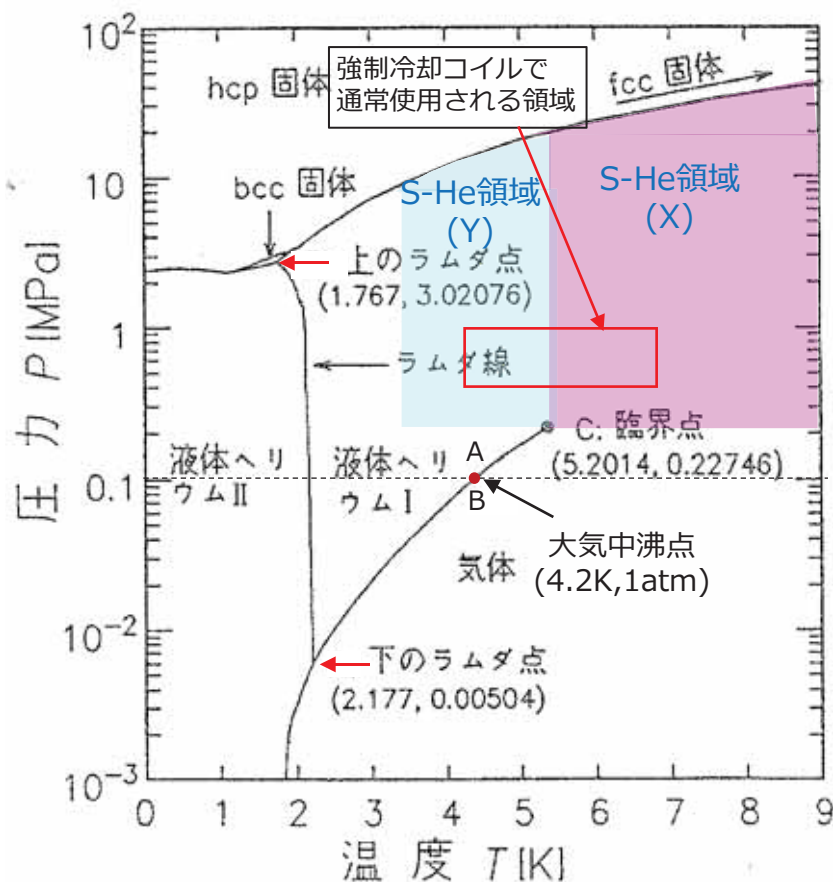
液体ヘリウム(L-He)

1. Heの状態図(次頁)の液体ヘリウム I, II の領域
2. 大気圧下で使用する場合, 全体が沸点温度4.2Kとなる
3. コイル冷却に用いる場合, 被冷却体を潜熱で冷却するため, 入熱によって全体としては温度は変化しない
4. 液体ヘリウム II の領域で超流動が起きる

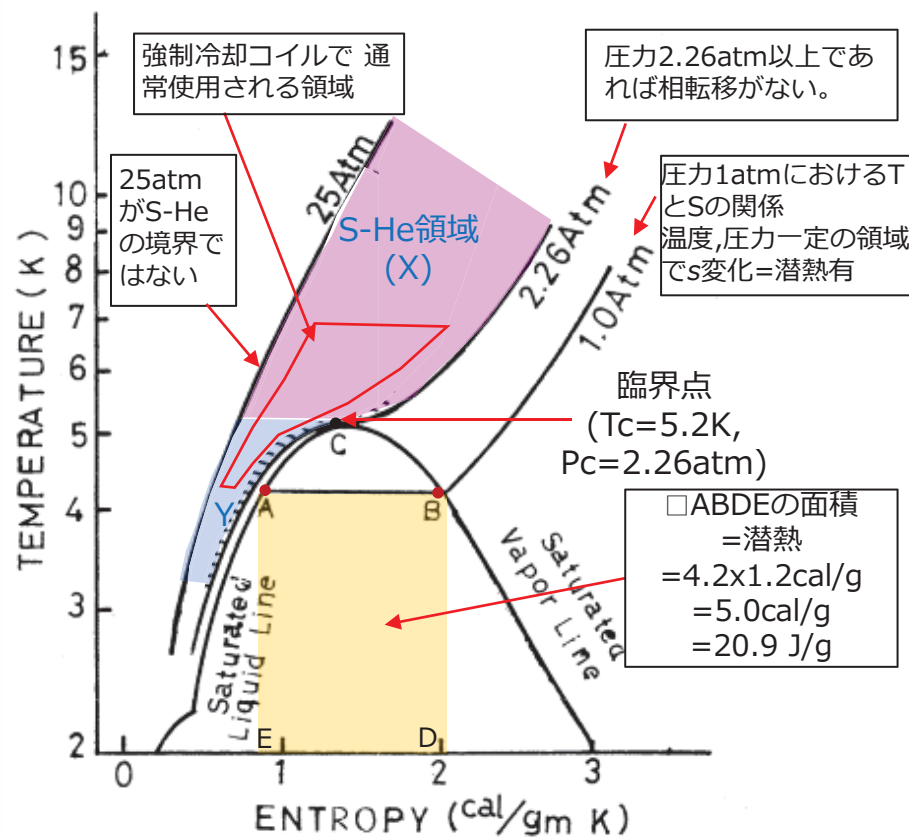
冷却技術：LTSにおける強制冷却技術（4）

P-T状態図, T-S線図上でのS-He領域

- S-He領域: 圧力>2.26atm(0.227MPa), 温度>5.2K の領域
(但し, 温度に関しては5.2K以下の領域も含める場合あり)
- S-He領域では相変化はない←強制冷却導体でS-Heを用いる理由の一つ



^4He のP-T状態図
([CR24], 但しS-He領域等は追記)



^4He の温度-エントロピー(T-S)線図
([CR25], 但しS-He領域等は追記)

機器開発の中の共通技術

機器開発の中の共通技術：回転機（1）

図表 54

プロジェクト名等	ニーズとしての線材技術	導体技術	コイル技術	HTS冷却技術
EcoSwing (3.6 MW級機の開発) (風力用界磁超伝導同期発電機) [AP1-AP6]	<ul style="list-style-type: none"> THEVA TPL2100 w12 mm, t0.12 mm 安定化銅：100 μm Ic：260 – 360 A@77K, sf Ic：600 A@30 K, 1.5 T 	<ul style="list-style-type: none"> 単線 運転電流： DC 330 A@30 K, 1.5T 	<ul style="list-style-type: none"> レーストラック型DP 1384 mm×221 mm 200ターン/DP 線材長：500 m/DP コイル内で線材を接続 	<ul style="list-style-type: none"> 20 K (設計温度は30 K) 冷凍機伝導冷却 回転子(界磁コイルと鉄心)を低温部に配置 冷凍機ヘッドは回転子とともに回転
SUPRAPOWER (10 MW機用MgB2コイル・冷却方法の要素試験) (風力用界磁超伝導同期発電機) [AP7-AP12]	<ul style="list-style-type: none"> Columbus SpA w3 mm×t0.7 mm 安定化銅：200 μm 19 フィラメント Ic：113 A@20 K, 1.8 T 	<ul style="list-style-type: none"> 単線 運転電流：DC 70 A 	<ul style="list-style-type: none"> レーストラック型DP 9 DP積層 622 mm×185 mm 145ターン/DP 線材長：356 m/DP 	<ul style="list-style-type: none"> 20 K 冷凍機伝導冷却 回転子(界磁コイルと鉄心)を低温部に配置 冷凍機ヘッドは回転子とともに回転
HTS-GEN, デンマーク (10 MW実機サイズのReBCO界磁コイル試作及び性能試験) (風力用界磁超伝導同期発電機) [AP13]	<ul style="list-style-type: none"> AMSC ReBCO w12 mm, t0.2 mm 安定化銅：不明 Ic：350 A@77K, sf Ic：500 A@40 K 	<ul style="list-style-type: none"> 単線 運転電流： DC 480 A@40 K, 1.7 T 	<ul style="list-style-type: none"> レーストラック型DP 直線部：698 mm R部：内75 mm, 外125 mm 304ターン/DP 線材長：650 m 	<ul style="list-style-type: none"> 40 K 冷凍機伝導冷却 界磁コイルと鉄心を低温部に配置
INNWIND 他 (10 MW機用MgB2コイル・冷却方法の要素試験) (風力用界磁超伝導同期発電機) [AP14]	<ul style="list-style-type: none"> ASG, MgB2 w3 mm, t0.7 mm 安定化銅：3 μm×0.2 mm マルチフィラメント Ic：235 A@20K, 1.8 T 	<ul style="list-style-type: none"> 単線 運転電流： DC 225 A@12 K, 2.8 T 	<ul style="list-style-type: none"> レーストラック型DP 10 DP積層 直線部：500 mm R部：内直径300 mm 208ターン/DP 線材長：4500 m 	
KIT, 華中技科大 (10 kW実験機用無絶縁GdBCO界磁コイルの試作・試験) (風力用界磁超伝導同期発電機) [AP15-AP16]	<ul style="list-style-type: none"> 不明 w12 mm, t0.22 mm 安定化銅：100 μm Ic：190 - 209 A@77 K 	<ul style="list-style-type: none"> 単線 運転電流： DC 450 A@30 K (コイル中心磁界 0.35 T) 	<ul style="list-style-type: none"> レーストラック型DP 455 mm×170 mm 230ターン/DP 線材長：200 m/DP 無絶縁コイル 	<ul style="list-style-type: none"> 30 K 冷凍機伝導冷却
ロシア (1 MW実証機の開発・試験) (風力用界磁超伝導同期発電機) [AP17]	<ul style="list-style-type: none"> AMSC – Amperium™, Type 8501 w4.8 mm, t0.21 mm 安定化銅：不明 Ic：95 - 105 A@77 K, 0.7 T 	<ul style="list-style-type: none"> 単線 運転電流： DC 40 A@77 K, 0.7 T 	<ul style="list-style-type: none"> レーストラック型DP 3 DP積層 寸法：不明 388ターン/DP 線材長：5200 m/(3DP×10 poles) 	<ul style="list-style-type: none"> LN2浸漬冷却

超電導で拓くカーボンニュートラル社会

機器開発の中の共通技術：回転機（2）

図表 55

プロジェクト名等	ニーズとしての線材技術	導体技術	コイル技術	HTS冷却技術
川崎重工 (NEDO 1 MW機) (船舶用界磁超伝導同期電動機) [AP18]	<ul style="list-style-type: none"> 住友電工 DI-BSCCO 詳細不明 マルチフィラメント lc : 200 A@30 K, 3 T 	<ul style="list-style-type: none"> 単線 運転電流 : DC 200 A@30 K 	<ul style="list-style-type: none"> レーストラック型DP 1478 mm(直線部 1200 mm) 670ターン/DP 線材長 : 1950 m/DP 	<ul style="list-style-type: none"> 20 K(設計温度は30 K) Ghe冷却 界磁コイルを含む回転子全体を冷却
川崎重工 (NEDO 3 MW機) (船舶用界磁超伝導同期電動機) [AP18, AP19]	<ul style="list-style-type: none"> 住友電工 DI-BSCCO 詳細不明 マルチフィラメント lc : 200 A@30 K 	<ul style="list-style-type: none"> 単線 運転電流 : DC 200 A@30 K 	<ul style="list-style-type: none"> レーストラック型DP 2 DP積層 1685 mm(直線部 1300 mm) × 321 mm 1800ターン/DP 線材長 : 70 km/12DP 	<ul style="list-style-type: none"> 20 K(設計温度は30 K) Ghe冷却 界磁コイルを含む回転子全体を冷却
AMSC, US Navy (36.5 M実機全負荷試験) (船舶用界磁超伝導同期電動機) [AP20]	<ul style="list-style-type: none"> AMSC 詳細不明 	<ul style="list-style-type: none"> 単線 不明 	<ul style="list-style-type: none"> 詳細不明 	<ul style="list-style-type: none"> 詳細不明
Doosan (5 MW船舶用試作・試験) (船舶用界磁超伝導同期電動機) [AP21]	<ul style="list-style-type: none"> 不明 w4 mm, t0.24 mm 安定化銅 : 不明 lc : 不明 	<ul style="list-style-type: none"> 単線 運転電流 : DC 100 A@27 K, 3 T(設計値) DC 58 A@27 K(実験値) 	<ul style="list-style-type: none"> レーストラック型DP 1330 mm(直線部1200 mm) 2500ターン/6DP 線材長 : 50 km/36DP 	<ul style="list-style-type: none"> 27 K LNe循環冷却 界磁コイルを含む回転子全体を冷却
海洋大, 北野精機, 福井大 (ラジアルギャップ型100 kW実証機用のBi界磁コイル開発・試験) (船舶用界磁超伝導同期電動機) [AP22]	<ul style="list-style-type: none"> 住友電工 詳細不明 	<ul style="list-style-type: none"> 単線 運転電流 : DC 200 A@30 K (コイル中心磁界 0.7 T) 	<ul style="list-style-type: none"> 円形型DP 3 DP積層 直径160 mm 	<ul style="list-style-type: none"> 不明

機器開発の中の共通技術：回転機（3）

図表 56

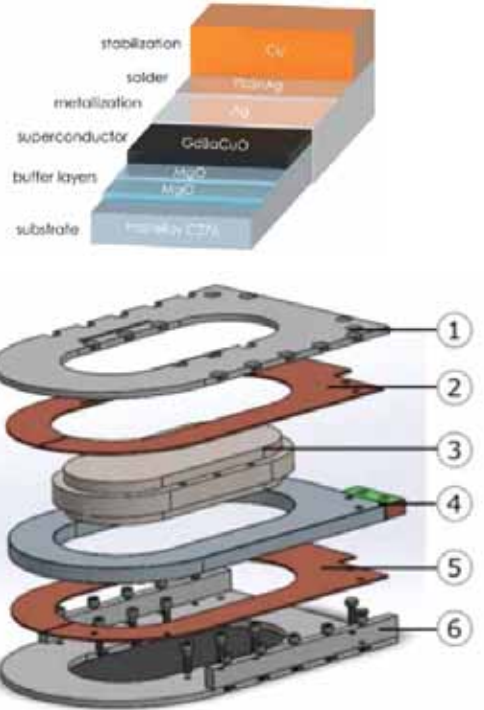
プロジェクト名等	ニーズとしての線材技術	導体技術	コイル技術	HTS冷却技術
中国 Tsinghua Uni. Guangdong Power Grid Co. (300 kVar試験機開発) (界磁超伝導型同期調相機) [AP23, AP24]	<ul style="list-style-type: none"> Shanghai ST w5 mm × t0.38 – 0.43 mm 安定化銅：不明 lc：不明 	<ul style="list-style-type: none"> 単線 通電電流： DC 170 – 200 A@25 K 	<ul style="list-style-type: none"> レーストラック型DP 4 DP積層 622 mm × 185 mm 1010ターン/4DP 	<ul style="list-style-type: none"> GHe間接冷却 回転子(界磁コイル+鉄心)を冷却
サザンプトン大 (100 kVA同期発電機の開発) (界磁超伝導型同期発電機) [AP25, AP26]	<ul style="list-style-type: none"> Bi2223 詳細不明 lc：不明 	<ul style="list-style-type: none"> 単線 運転電流：不明 	<ul style="list-style-type: none"> 長方形型SP 10 SP積層 344 mm × 168 mm 40ターン/SP 	<ul style="list-style-type: none"> LH2循環冷却 回転子(界磁コイル+鉄心)を冷却
Kalsi Green Power Systems, Victoria大 (3 MW航空機用概念設計) (全超伝導電動機) [AP27]	<p>回転子用</p> <ul style="list-style-type: none"> w2 mm × t不明 lc：480 A <p>固定子用</p> <ul style="list-style-type: none"> w2 mm × t不明 マルチフィラメント(0.33 mm, 6分割) lc：480 A 	<p>回転子用</p> <ul style="list-style-type: none"> CORC® cable 2素線/層 × 8層(16素線) ケーブル外径：3.3 mm ケーブル撚りピッチ：5.68 mm lc：6864@20 K, sf 運転電流：DC 3171 A@20 K <p>固定子用</p> <ul style="list-style-type: none"> CORC® cable 2素線/層 × 8層(16素線) ケーブル外径：3.3 mm ケーブル撚りピッチ：5.68 mm 運転電流：AC 3171 Arms@20 K 	<p>回転子用</p> <ul style="list-style-type: none"> サドルコイル 内径125mm, 外径132mm, 直線部300mm <p>固定子用</p> <ul style="list-style-type: none"> サドルコイル 内径145mm, 外径153mm, 直線部300mm 	<ul style="list-style-type: none"> GH2とLH2冷却
九州大 (2 MW航空機用概念設計) (全超伝導機) [AP28]	<p>回転子用</p> <ul style="list-style-type: none"> w5 mm × t0.112 mm 銀, 10 μm <p>固定子用</p> <ul style="list-style-type: none"> w5 mm × t0.112 mm 銀, 10 μm マルチフィラメント(20分割以下) lc：380 A 	<ul style="list-style-type: none"> 運転電流：285 A(65 K) – 1600 A(20 K) 	<ul style="list-style-type: none"> 変圧器と同様の転位巻き 	<ul style="list-style-type: none"> GHe(20 K) LN2 (65 K)

機器開発の中の共通技術：回転機（４）

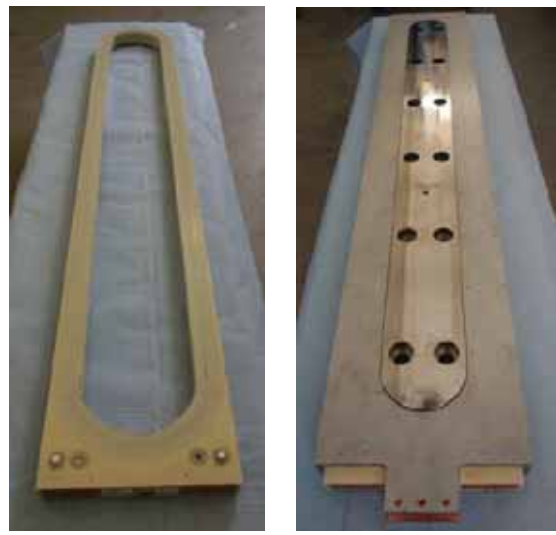
EcoSwing [AP1-AP6]

図表 57

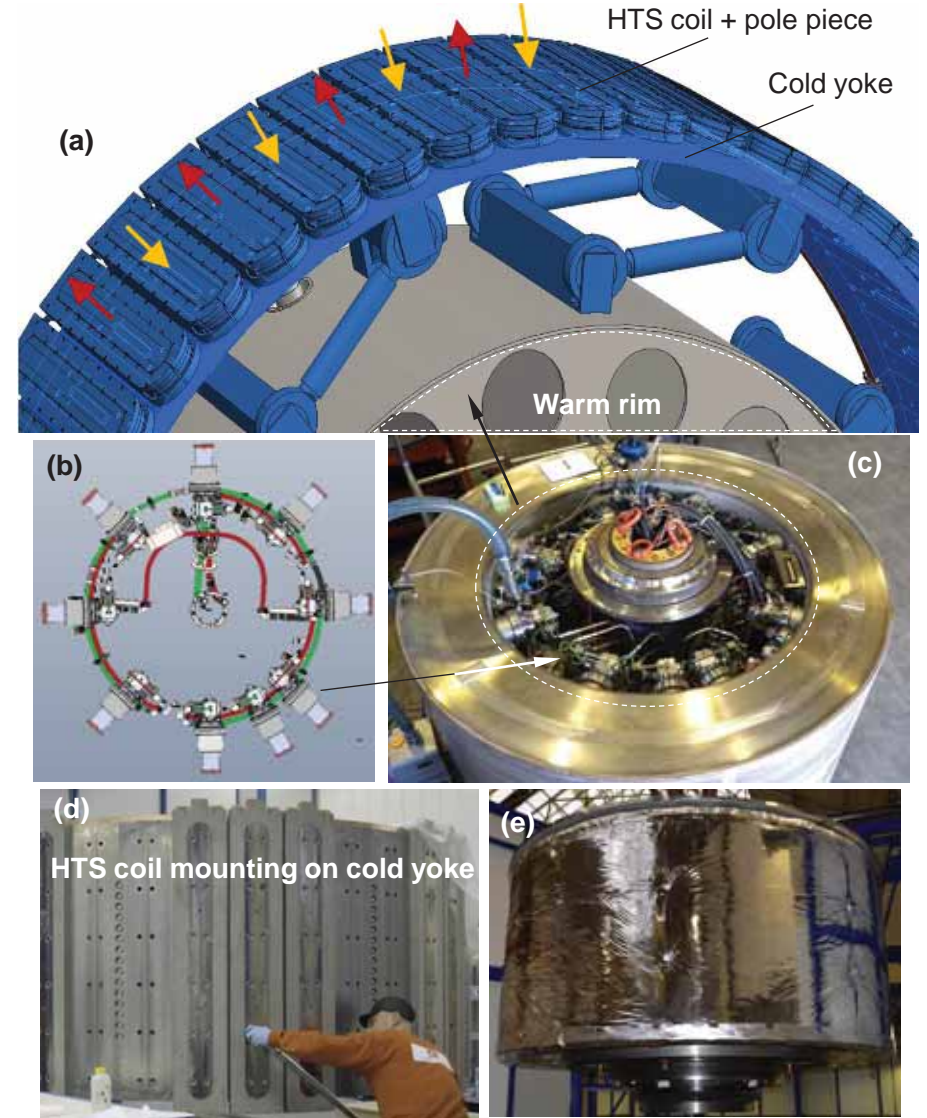
THEVA Pro-Line TPL2100		EcoSwing rotor coil	
Tape width	12 mm	Geometry	Double-pancake
Thickness tape	0.21 mm	Length wire coil	>500 m
Copper thickness	100 μ m	Length coil	~1400 mm
Minimum double bend diameter (RT)	60 mm	Lap joints	Up to 10
Maximum rated stress (RT)	300 MPa	Insulation between turns	16 μ m thick foil
Maximum rated tensile stress (77 K)	0.3%	Insulation between layers	25 μ m thick foil
Minimum I_c (77 K, SF)	250-360 A	Insulation test	10 M Ω at 1 kV
		Current connection	Two Cu connections at NDE
		Weight winding pack	48 kg
		TRL	7



- ① top steel plate
- ② top copper plate
- ③ iron-nickel core
- ④ winding pack
- ⑤ copper plate
- ⑥ bottom steel plate and side supports



Winding pack HTS coil with pole piece



機器開発の中の共通技術：回転機（5）

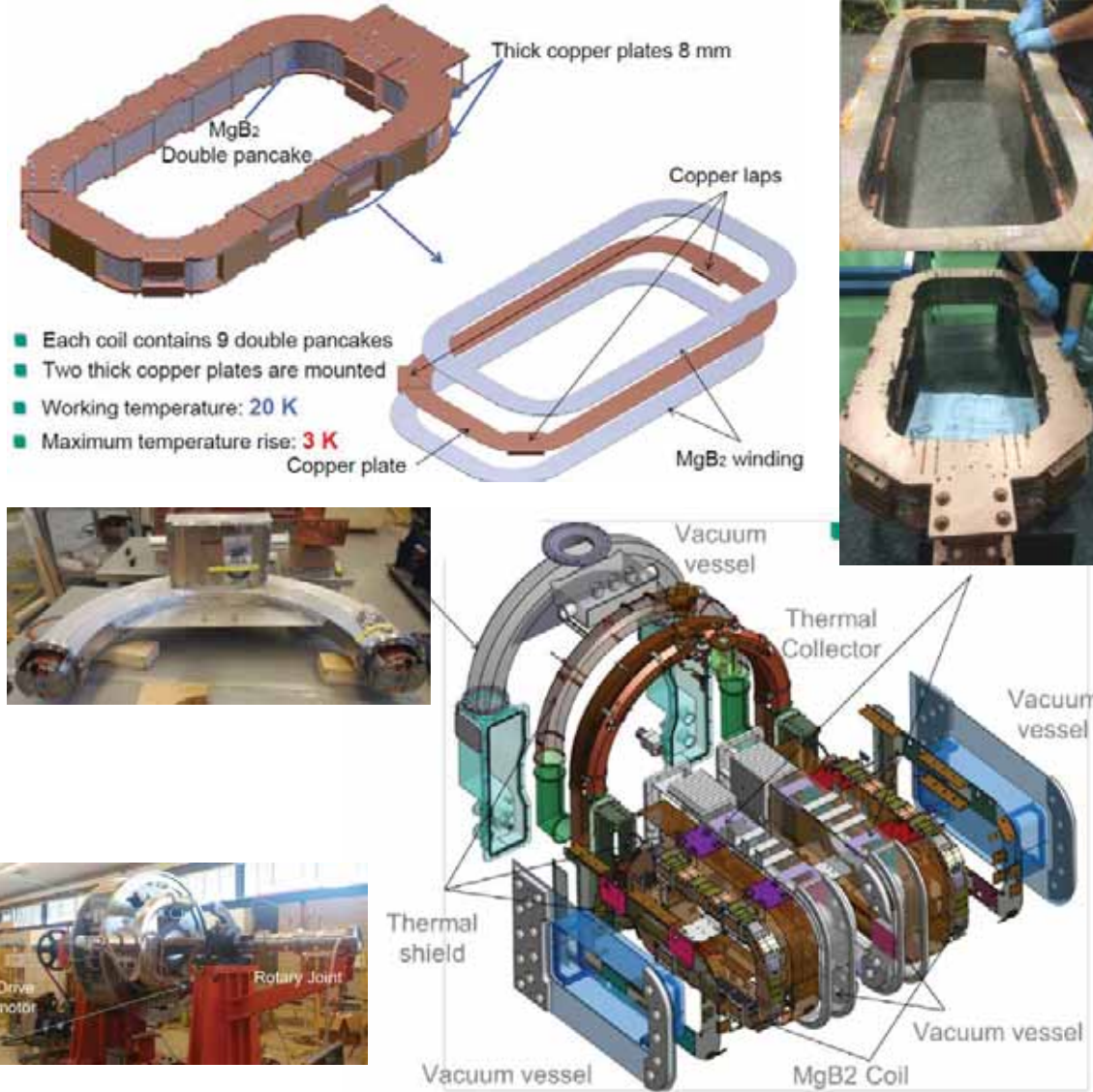
図表 58

SUPRAPOWER [AP7-AP12]

Coil	Stack of racetrack DPs
Number of DPs	9
Number / thickness of copper caps	2 / 8 mm
Insulation layers between DPs	G11
Insulation layer thickness	0.2 mm
Coil radius inner/outer	100 mm / 165 mm
Total thickness	~93.6 mm
Straight side length end parts	185 mm
Straight side body	622 mm
Total Wire length	~ 3200 m

SC4	Racetrack DP coil
Mean dimension per wire in the coil	3.200 x 0.885 mm
Number of turns per layer	72.5
Number of layers	2
Layer jump length	185mm
Total number of turns	145
Cross section	65.4 x 8.40 mm ²
Copper sheet thickness	2 mm
Total coil thickness	8.40 mm
Inner / outer coil radius	100 mm / 165.4 mm
Straight side length end parts	185 mm
Straight side active parts	622 mm
Total wire length	~356 m
Impregnation	Araldit F, (vacuum impreg.)
Minimum I _{c,coil} @ 20 K	355 A
Maximum B _{c,coil} @ 20 K	0.78 T
Self-induction	56 mH
Resistance (T=300 K)	6.61 Ω

MgB ₂ wire	Sandwich class
Batch / Sheath	V1579 / Ni
Dimensions	3 x 0.5 mm
Number of MgB ₂ filaments	19
Filling Factor (no stabilizer)	24.1%
Stabilizer	0.2 mm Cu strip (RRR 150)
Stabilizer features	One side SnPb soldered
Insulation	Dacron 62.5 μm
Wire dimensions (bare)	3 x 0.7 mm
Wire dimensions (insulated)	3.125 x 0.825 mm
I _c @ μ ₀ H= 1.8 T, 20 K	113 A
dI _c /dB @ μ ₀ H=1.8 T, 20 K	100 A/T
J _{ce} (A/mm ²) @ μ ₀ H=1.8 T, 20 K	58.18 A/mm ²
Bending diameter (Cu outside)	150 mm



機器開発の中の共通技術：回転機（6）

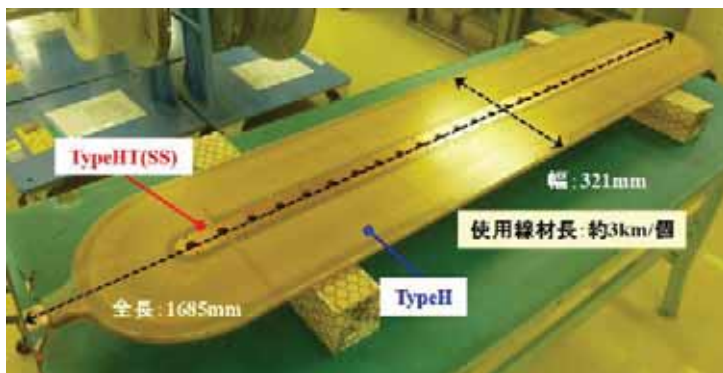
図表 59

NEDO 3 MW 船用モータ



[AP18, AP19]

Length	1620 mm
Width	320 mm
Straight section length	1300 mm
Inner diameter	50 mm
Winding	Double pancake
Number of Coils	24 coils/6 poles
Amount of DI-BSCCO wire	70 km/24 coils
Number of total turns	21,600 turns
Rated current	200 A at 30 K
Inductance	0.8 H at 1 Hz, room temperature
Withstand voltage	1 kV



ロシア 1 MW 発電機 [AP17]

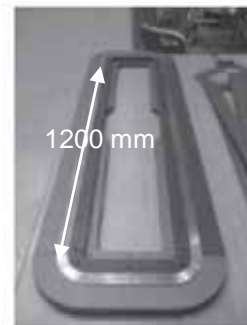
Table 1. Parameters of 1 MVA Synchronous HTS-2G generator

List of Parameters	units	value
Nominal Output Power	KVA	1000
Phase voltage	V	690
Nominal Speed	min ⁻¹	600
Pole number	-	10
Nominal current	A	500
Inner diameter of the stator	mm	800
Active light	mm	400
Mass	kg	4200
Material of stator winding	-	Cu
Operating temperature of stator winding	K	300
Material of field coils	-	HTS-2G tape
Operating temperature of field coils	K	77
Nominal current in field coils (in 0.5 T field)	A	40
Number of turn per one pole	-	388
Operating Power factor	-	0.95 - 0.99
Full load efficiency (without the cryocooler)	%	97 - 98



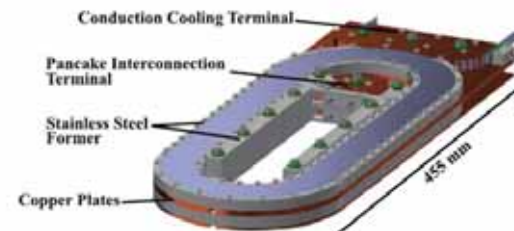
AMSC - Type 8501
4.8 × 0.21 mm

DOOSAN 5 MW 船用モータ [AP21]

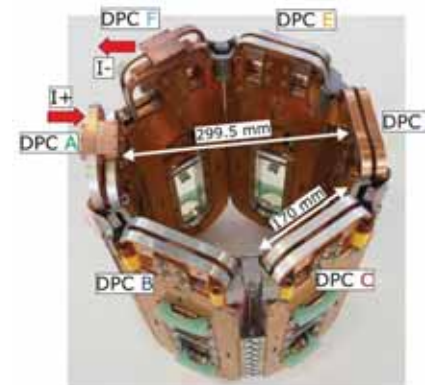


REBCO線材
4.0 × 0.24 mm²
1330 mm(直線部1200 mm)
2500ターン

KIT・華中技科大 10 kW 発電機 [AP15, AP16]

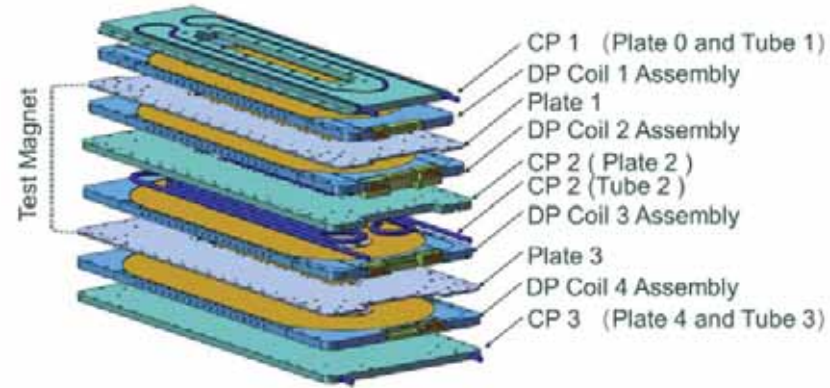
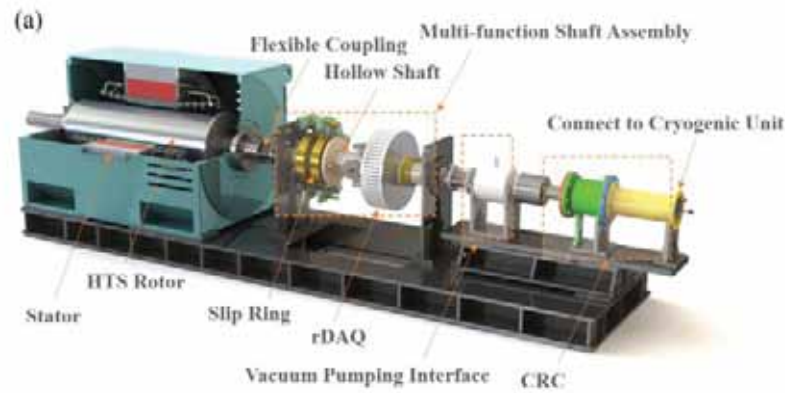


無絶縁コイル

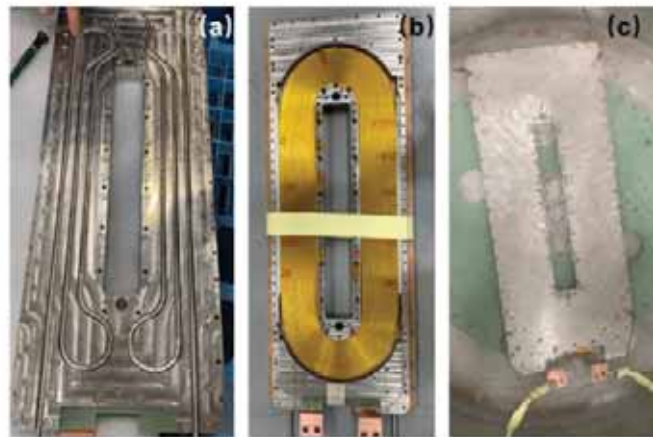
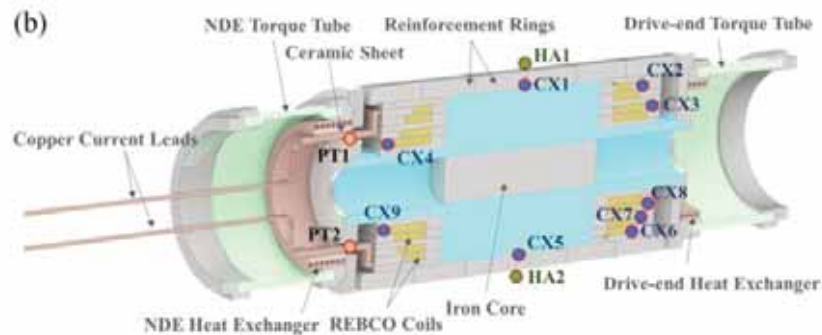


機器開発の中の共通技術：回転機（7）

中国 300 kVar 同期調相機 [AP23, AP24]



HTS Coils	Thickness of Insulated HTS Tape (mm)	Straight Length (mm)	Round End Inner Diameter (mm)	Number of Turns
Coil 1	0.40	300	60	166
Coil 2	0.37	300	60	250
Coil 3	0.43	300	60	248
Coil 4	0.38	300	60	346



サザンプトン大
100 kW 同期発電機 [AP25, AP26]



図表 60

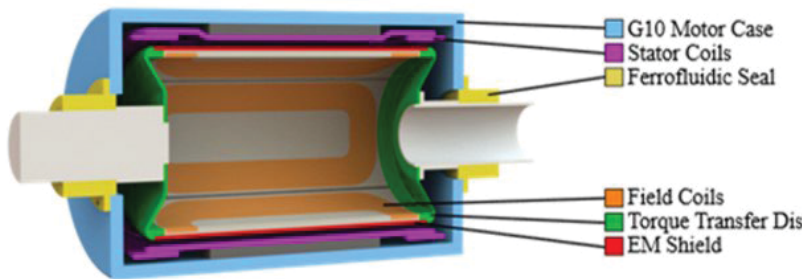
機器開発の中の共通技術：回転機（8）

図表 61

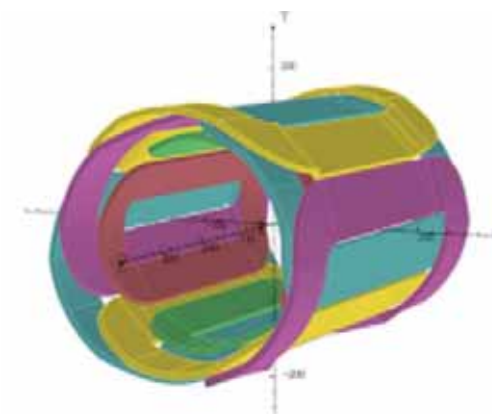
Kalsi GPS & ビクトリア大 3 MW 航空機用全超伝導モータ（概念設計） [AP27]

Parameter	Value
Motor Rating	3 MW
Motor Speed	4,500 RPM
Line Voltage	~1000 V
Rated power factor	0.9 lag
Motor diameter	< 500 mm
Axial length	< 800 mm
Field excitation winding	CORC
Armature winding	CORC and MgB ₂
Operating temperature	20 K
Ambient temperature	120 K

Parameter	CORC	MgB ₂
Motor power rating, MW	3.4	3.5
*Line voltage, V	1103	2206
*Line current, A	1785	920
Frequency, Hz	150	150
Base Impedance, ohm	0.36	1.38
D-axis synchronous reactance (X _d), pu	0.58	0.33
D-axis transient reactance (X _{d'}), pu	0.23	0.11
D-axis sub-transient reactance (X _{d''}), pu	0.21	0.11
Q-axis synchronous reactance (X _q), pu	0.58	0.33
Q-axis sub-transient reactance (X _{q''}), pu	0.23	0.12
Field winding current at rated load, A	3171	3195
Load angle at rated load, deg	4.2	2.8



Parameter	Rotor	Stator
Central former material	Aluminum	Aluminum
Width of REBCO tape, mm	2	2
Number of striations	0	6
Width of each striation, mm	2	0.33
Number of layers	8	8
Number of tapes	16	16
Tape pitch, mm	5.68	5.68
Cable OD, mm	3.3	3.3
Critical current of each strand, A	480	480
Self-field critical current, A	6864	6864

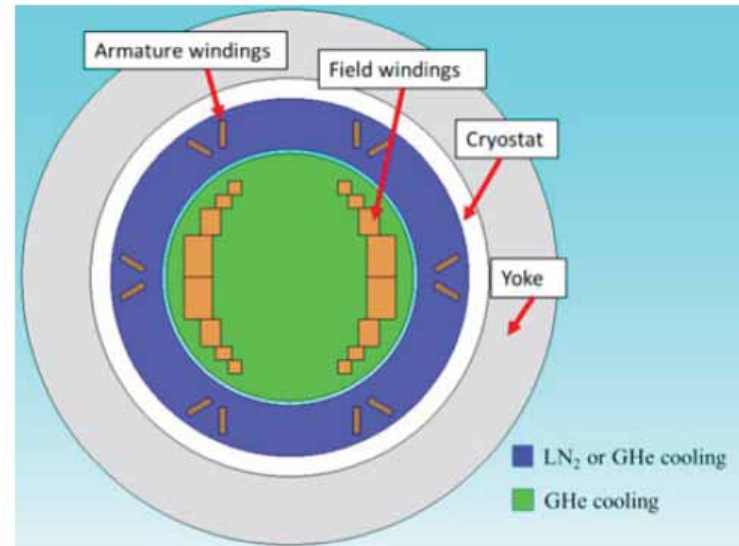


機器開発の中の共通技術：回転機（9）

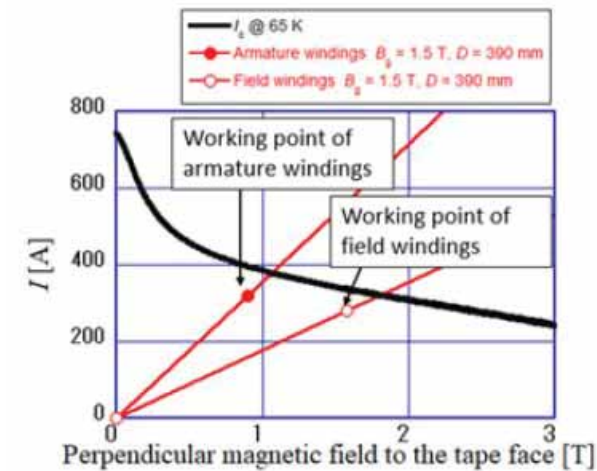
図表 62

九州大 **2 MW** 航空機用全超伝導モータ（概念設計） [AP28]

Width	5 mm
Thickness	112 μm
Substrate	Hastelloy (110 μm)
Buffer layer	CeO ₂ (0.62 μm) + LaMnO ₃ (0.008 μm) + MgO (0.005 μm) + Y ₂ O ₃ (0.014 μm) + Gd ₂ Zr ₂ O ₇ (0.055 μm)
Superconducting layer	EuBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} + BaHfO ₃ [3.5 mol%] (3.6 μm)
Stabilizing layer	Silver (10 μm)
Number of filaments	1 - 20 (Laser-scribed)
I_c at 77K, self field	> 380 A



Output power	2 MW
Voltage	615~3710 Vrms
Armature current	202~1131 Arms
Number of poles	2
Frequency	50 Hz
Number of revolutions	3000 rpm
Field current	285~1600 A
Operating temperature	20, 40, 65 K
Cooling	GHe, LN ₂
COP of cryocooler	0.0125, 0.025, 0.1
Ratio of the rated peak current to I_c	0.8
Rotor diameter	120~240 mm
Effective length	1000 mm
Gap	3 mm



機器開発の中の共通技術：変圧器（1）

図表 63

プロジェクト名等	ニーズとしての線材技術	導体技術	コイル技術	HTS冷却技術
九州大 (22 kV/6.9 kV変圧器開発) [AP29]	<ul style="list-style-type: none"> • Bi-2223 • 詳細不明 • 安定化銅：不明 • I_c : 42.4 A@sf, 77 K 	<ul style="list-style-type: none"> • 1次巻線：2素線 • 運転電流：AC 45.4 Arms@77 K • 2次巻線：6素線 • 運転電流：AC 174 Arms@77 K 	<ul style="list-style-type: none"> • 1次巻線：4レイヤー巻 • 2次巻線：2レイヤー巻 	<ul style="list-style-type: none"> • LN2浸漬冷却
九州大, ISTEK (6.9 kV/2.3 kV-400 kVA限流変 圧器開発) [AP30]	<ul style="list-style-type: none"> • YBCO • w5 mm \times t0.16 • 安定化銅：50 μm • w5 mm \times t0.41 • 安定化銅：300 μm • I_c : 不明 	<ul style="list-style-type: none"> • 1次巻線：単線 • 通電電流：AC 58 Arms@66 K • 2次巻線：3素線 • 通電電流：AC 174 Arms@66 K 	<ul style="list-style-type: none"> • 1次：6レイヤー, 576ターン • 内径404mm • 2次:2レイヤー, 192ターン • 内径346mm 	<ul style="list-style-type: none"> • サブクール窒素冷却
New Zealand Industrial Research Ltd. Victoria大 (1 MVA-11 kV/415 V変圧器開) [AP31-34]	<ul style="list-style-type: none"> • SuperPower • 1次(単線)：4mm \times 0.22mm • 2次(導体)：12.1mm \times 0.80mm • I_c : 2093.5 A@sf, 77 K(2次) 	<ul style="list-style-type: none"> • General Cable Superconductors, Ltd. (導体 化) • 1次：単線 • 運転電流：30 Arms • 2次：Roebel Cable (15素線, 素線幅5 mm) • 運転電流：1390 Arms 	<ul style="list-style-type: none"> • 1次：912ターン (48ターン, 19層) • 2次：20ターン (20ターン, 1層) 	<ul style="list-style-type: none"> • サブクール窒素冷却
鉄道総研 (新幹線用4 MVA主変圧器の2次- 内層側巻線試作・試験) [AP35]	<ul style="list-style-type: none"> • 住友電工, Bi-2223 • w4.2 mm \times t0.24 mm • マルチフィラメント • I_c : 72 - 84 A@77 K, s. f. 	<ul style="list-style-type: none"> • 転位積層導体 (8素線) • 6ターン毎に転位 • 運転電流：750 Arms • 平行磁界：0.247 Tp • 垂直磁界：0.069 Tp 	<ul style="list-style-type: none"> • 内直径305mm • 高さ612mm • 96ターン・1層巻 	<ul style="list-style-type: none"> • LN2浸漬冷却
Innova Superconductivity Beijing Jiaotong Univ. (6.5 MVA-25 kV/1.9 kV鉄道用 変圧器概念設計) [AP36]	<ul style="list-style-type: none"> • Innova, Bi-2223 • 詳細不明 • I_c : 550 A以上@s.f., 65 K 	<ul style="list-style-type: none"> • 転位積層導体 • 1次：2-3素線 • 通電電流:264 Arms • 2次：6素線導体 \times 4並列 • 通電電流:3400 Arms • 平行磁界：0.38 Tp • 垂直磁界：0.19 Tp 	<ul style="list-style-type: none"> • 1次：1961ターン • 内径430mm, 外径470mm • 2次:149ターン • 内径305mm, 外径365mm • 巻線高さ:491mm 	<ul style="list-style-type: none"> • サブクール窒素冷却

機器開発の中の共通技術：変圧器（2）

図表 64

九州大 22 kV/6.9 kV変圧器開発 [AP29]

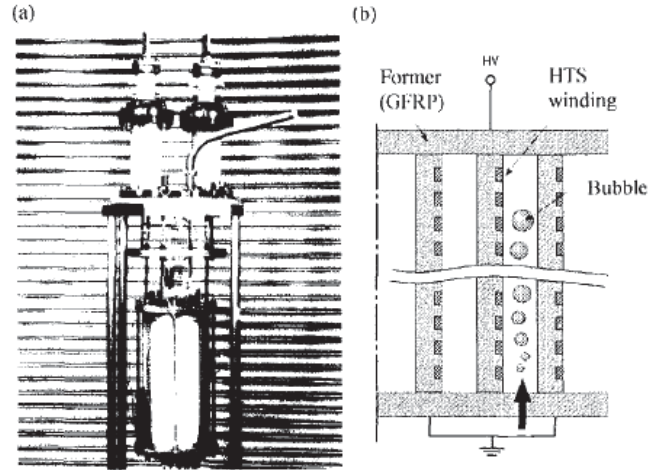
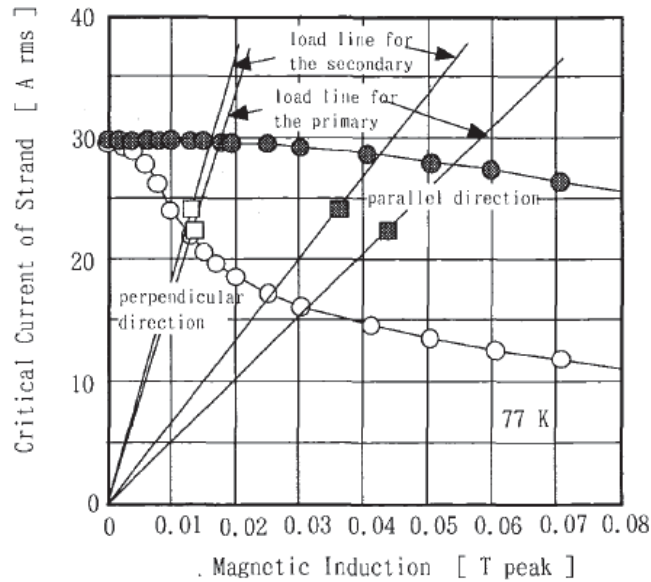
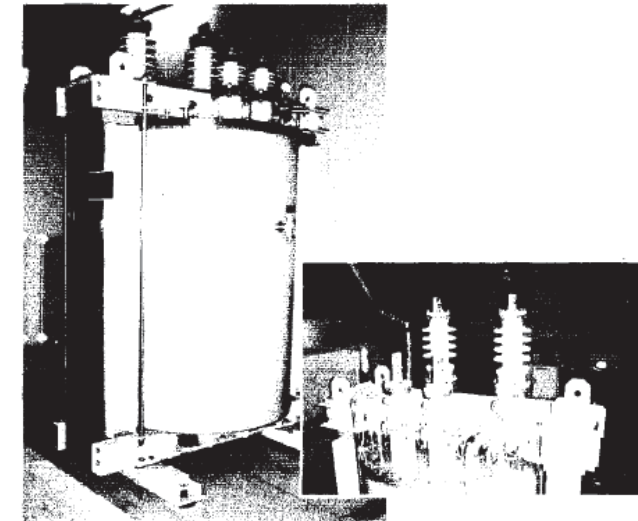


Fig. 1 (a) An overview of the model coil for over-current tests, and (b) a cross-sectional view of the local model coil for AC withstand voltage tests.



MAIN DESIGN PARAMETERS OF HTS FIELD-TEST TRANSFORMER	
Parameters	Design values
Capacity	1 MVA
Primary/Secondary voltage	22 kV / 6.9 kV
Primary/Secondary current	45.4 A / 145 A
Winding type	Cylindrical / cylindrical
Layer number	4 / 2
1-turn voltage	39.3 V / 39.2 V
Operation temperature	77 K
Frequency	60 Hz
Magnetic induction in core	1.6 T (room temperature)
% impedance	5.0 %
Coolant	Liquid nitrogen
Strand	Bi-2223 multifilamentary tape
Twist pitch of strand	No twist
Matrix of strand	Mn-Ag
Strand number in winding	2 / 6
Conductor type	Transposed parallel conductor
Maximum level of over-current	5 times as large as rated level
AC withstand voltage	50 kV rms
Lightning impulse voltage	100 kV peak

MAIN RESULTS OF CHARACTERISTIC TESTS FOR HTS TRANSFORMER	
Test items	Results
Individual tests	(operated in liquid nitrogen of 77 K)
Short-circuit test	AC loss of windings at rated levels of current : 0.206 kW (in liquid nitrogen)
No-load test	Core loss at rated levels of voltage : 3.20 kW (in room temperature space)
Rated capacity	1000 kVA
Efficiency	99.4 % (refrigeration penalty: 10)
AC withstand voltage test	50 kV, 60 Hz, 1 min. (OK)
Lightning impulse test	Peak level of full wave : 100 kV (OK)
Field tests with cryocoolers	(operated in subcooled liquid nitrogen)
Short-circuit test	10-hour steady operation equal to 1000 kVA short-time operation equal to 1670 kVA
Inrush tests	5-time inrush current for 0.2 s (no quench)
Connection with grid	18-hour steady operation of 821 kVA 144-hour steady operation of 586 kVA



機器開発の中の共通技術：変圧器（3）

図表 65

九州大 6.9 kV/2.3 kV限流変圧器開発 [AP30]

TABLE I
PARAMETERS OF 1 ϕ -400 kVA SUPERCONDUCTING TRANSFORMERS

Number of phases	1
Rated capacity	400 kVA
Rated frequency	60 Hz
Rated voltage (Prim./Second.)	6.9 kV / 2.3 kV
Rated current (Prim./Second.)	58A / 174 A
% Impedance for type-R	15 % (400 kVA standard level)
% Impedance for type-L	10 %
Number of tapes in the parallel conductor (Prim./Second.)	1 / 3
Number of turn / phase (Pri./Sec.)	576 / 192
Number of layer (Prim./Second.)	6 / 2
1turn voltage	12.0 V/turn
Winding form	Cylindrical winding
Total length of YBCO tapes	1.60 km (type-R), 1.66 km (type-L)
Dimensions in Fig. 2 (A, B, C, D)	
for type-R	206 mm, 346 mm, 17.1 mm, 41.0 mm
for type-L	195 mm, 374mm, 54.8 mm, 16.9 mm
Operating temperature	66 K subcooled LN ₂
Outer Size	W 1175 x D 1020 x H 2284 mm ³
Weight	2.8 ton



Fig. 1. Photograph of a 1 ϕ -6.9 kV/2.3 kV-400 kVA transformer [5], [6].

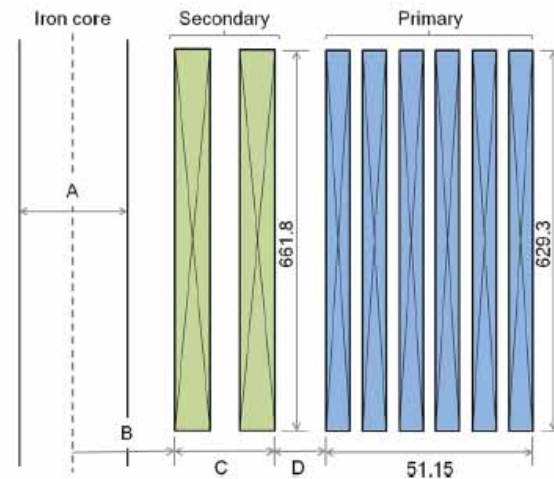


TABLE II
PARAMETERS OF REBCO SUPERCONDUCTING TAPES

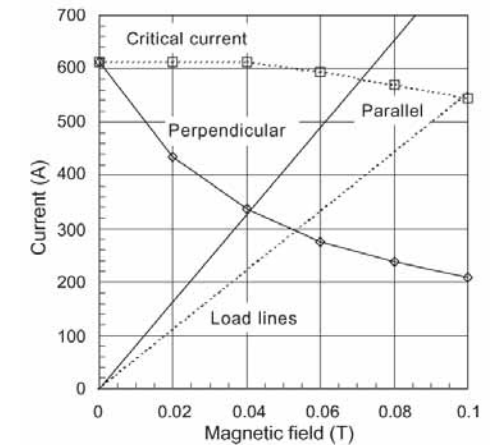
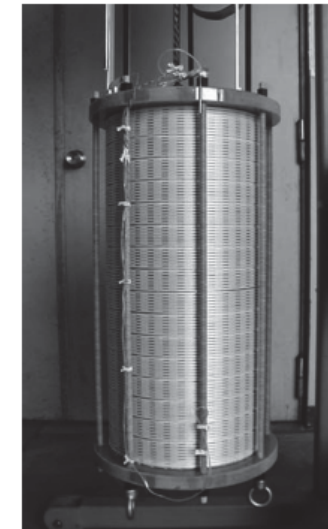
Production process	IBAD-PLD
Superconductor	YBCO (1 μ m)
Buffer layer	Al ₂ O ₃ (120 nm), Y ₂ O ₃ (20 nm), MgO (10 nm), CeO ₂ (500 nm)
Substrate	Hastelloy (100 μ m)
Stabilizing layer for type-R	Ag (8 μ m), Copper (300 μ m)
Stabilizing layer for type-L	Ag (18 μ m), Copper (50 μ m)
Cross section (Width x Thickness)	5 mm x 0.16-0.41 mm

The numerical value in the parentheses corresponds to the thickness.

鉄道総研 新幹線用4 MVA主変圧器の2次-内層側巻線試作・試験 [AP26]

SPECIFICATION OF HIGH-T_c SUPERCONDUCTING COIL

Wire	Material	Bi2223 silver/manganese alloy sheathed superconducting tape
	Cross section	4.2 mm x 0.24 mm
	Insulation	PVF
	Number of Parallels	8
Winding	Inner diameter	ϕ 305 mm
	Height	612 mm
	Number of turns	96 turns x 1 layers = 96 turns
	Structure	Multi-strand single-layer solenoid coil 15 times transpositions (every six turns)
Current		215 A _{rms} @ 77K, self-magnetic field
Inductance		1.16 mH



機器開発の中の共通技術：変圧器（４）

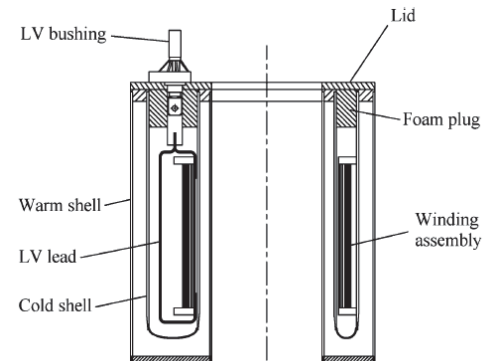
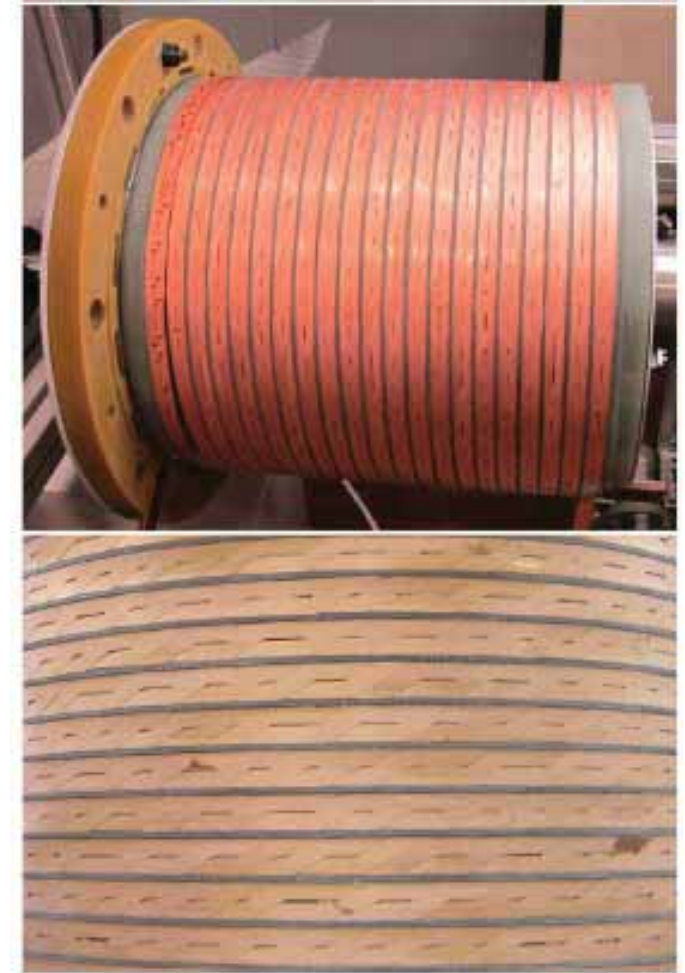
図表 66

New Zealand Industrial Research Ltd., Victoria大 1MVA-11 kV/415 V変圧器開発 [AP31-AP34]

Parameter	Value
Primary Voltage	11,000 V
Secondary Voltage	415 V
Max. Operating Temperature	70 K, liquid nitrogen cooling
Target Rating	1 MVA
Primary Connection	Delta
Secondary Connection	Wye
LV Winding	20 turns 15/5 YBCO Roebel cable
LV Rated winding current	1390 A rms
HV Winding	918 turns of 4 mm YBCO wire
HV Rated winding current	30 A rms

	40 MVA	1 MVA	Ratios
Rated power (MVA)	40	1	40
LV cable length per phase (m)	167	20	8.35
LV winding voltage rms (V)	6350	240	26.5
LV rated current amplitude (A)	2969	1964	1.51
LV I_c (A)	3500	3500	1
LV $I_{m, rated} / I_c$	0.848	0.561	1.51
HV wire length per phase (m)	3041	1001	3.04
HV winding voltage rms (V)	110000	11000	10
HV rated current amplitude (A)	171.4	42.9	4
HV I_c (A)	194.4	194.4	1
HV $I_{m, rated} / I_c$	0.882	0.220	4

	HV	LV
Internal diameter (mm)	345	310
No. of turns in axial direction	48	20
No. of turns in radial direction	19	1
Total turns	912	20
Conductor width (mm)	4	12.1
Conductor thickness* (mm)	0.22	0.80
Axial gap between turns (mm)	2.130	2.1
Roebel strand number	—	15
Strand width (mm)	—	5
Gap between Roebel stacks (mm)	—	2.1
Superconducting layer thickness (μm)	1.4	1.4



超電導で拓くカーボンニュートラル社会

図表 67

機器開発の中の共通技術：REBCO応用NMR・MRIマグネット

No.	機関名	PJ名, キーワード	線材	主要諸元	冷却方式	備考, 特徴など	引用元
1	MIT	1.3 GHz LTS-HTS NMR Magnet	REBCO (SuperPower, advance pinning)	ダブルパンケーキ積層コイル, Coil1(26p)+Coil2(32p)+Coil3(38p), 内径 ϕ 91~ ϕ 169.9, 外径 ϕ 119.1~ ϕ 211.3, 高さ323.65~465.8	LHe浸漬冷却	実機組立後の試験でクエンチ原因推定。試験時にコイルが損傷するほど動いた可能性がある。	[AP37]
2	HTS-110	1.5T-YBCO MRI	REBCO (AMSC Amperium wire)	125A-1.5T (20K)	伝導冷却	YBCO線で無冷媒のコンパクトな1.5TMRIの試作に成功した報告	[AP38]
3	三菱電機	half size active shieldtype 3T MRI	REBCO	メインコイル内径 ϕ 560、外径 ϕ 590-670、シールドコイル内径 ϕ 1140、外径 ϕ 1200、軸長980mm	伝導冷却	3T MRIの実機設計。積層パンケーキコイル数220個、線材長77km。3Tミニモデルも試作、室温ポア230mm, 35ppm, 100mmDSVで撮像完了	[AP39]
4	MIT, RTRI	compact NMR YBCO annuli	REBCO	積層プレート, 内径 ϕ 26、 \square 40mmまたは \square 46mm、0.08mm厚	(冷却方式不明)	YBCO積層プレートで構成したコンパクトNMRでの捕捉磁場の向上に関する報告	[AP40]
5	東芝	3T HTS MRI	REBCO	MainCoil内径 ϕ 501.5, 外径 ϕ 567~ ϕ 592.6, 142.7A-3T (20K)	伝導冷却	導電性樹脂を使ったREBCOコイルでの実機1/2サイズのMRI試作機。室温ポア380mmで3.8ppmVRMS、200mmDSV	[AP41]


図表 68

機器開発の中の共通技術：REBCO・Bi2212応用加速器マグネット

No.	機関名	PJ名, キーワード	線材	主要諸元	冷却方式	備考, 特徴など	引用元
1	LBNL, BNL, NHMFL, FNAL	US-MDP / Stress management Cos-theta (SMCT), Canteed Cos-theta (CCT)	REBCO CORCケーブル	コイル幅70-149、コイル内径R25-35	伝導冷却	加速器応用に向けたプロジェクト(US-MDP)。Bi-2212ラザフォード導体の使用も検討	[AP42]
2	BNL	FCC, HL-LHC	REBCO 4-ply (ASC)	REBCOレーストラックコイル, 100m/DP×2, (LTS)2T+(HTS)0.45T	浸漬冷却	FCC, HE-LHC等を想定したHTS/LTSハイブリッドダイポールに関する設計検討とコイル試作	[AP43]
3	CERN / CEA	EuCARD2-WP10.3 Feather-M2	REBCO Roebelケーブル	“Aligned block” コイル, 長さ 720 mm, 6.5kA-3.3T (5.7K)	gHe冷却	単独5T発生を目指すHTSダイポール磁石開発。クエンチ検出・保護に注力	[AP44]
4	CEA, Univ. Trento, etc.	ARIES (Accelerator Research and Innovation for European Science and Society)	REBCO 2-ply	12コイルのトロイド配置、使用線材長62km, metal-insulated, 2052A-11.9T	(冷却方式不明)	アルファ磁気分光器AMS-02(NbTi magnet)の代替、磁気剛性 3 Tm、外径3m以下、総重量6ton以下を目指す	[AP45]
5	LBNL, FNAL, ect.	US-MDP / Canteed Cos-theta(CCT)	REBCO CORC導体	導体長30m, aperture 70 mm, 4.845kA (4.2K, 1.2T)	vapor cooled (N ₂ , He)	CORC導体30m長による最初のHTC-CCT dipole磁石の実証試験	[AP46]
6	LBNL, NHMFL	DOE-OHEP / Canteed Cos-theta (CCT) coil	Bi-2212 round wire	350A (4.2K, 15T中), 0.3T発生	(冷却方式不明)	加速器マグネット用W&R Bi2212インサートコイル開発	[AP47]

図表 69

機器開発の中の共通技術：各種機器（1）

	Fault current limiter [AP48]	SMES [AP49]	Flywheel [AP50]	MCZ [AP51]	Induction Heater [AP52]	Magnetic Separator [AP53]
						
仕様	220kV, 50kA, 2019-2020の実証試験	3 MJ	300 kW、4t	300mm Si用カスプ磁場	1MW DC induction heater	1-1.5 T. mining industry products and the waste reduction
コイルタイプ	—	ダブルパンケーキ積層	ダブルパンケーキ積層	ダブルパンケーキ積層	レイヤー巻き	スプリット・レイヤー巻き
コイル仕様	—	ϕ in = 800mm ϕ out = 920mm h = 1500mm ダブルパン：96個 トータル：3900turn	ϕ in = 120mm ϕ out = 260mm ダブルパン：5個	ϕ in = 810mm ϕ out = 900mm ダブルパン：4個 500turn/singleパン	ϕ in = 2000mm layer = 7 Turn = 217	ϕ in = 148mm ϕ out = 218mm 断面：35 mm x 45 mm turn：784/コイル
線材長	25km	63 km	—	11.5 km	1.4 km 予定の1/4の量	450m x 2
lop	—	1 kA at ~30K	77.7A at ~50K	344A at ~30K	lop = 150A at 25~30K 1/4の量なので210A	lop = 80~120A at 50~65K
lc	>350A	90A at 77K/s.f	—	600A at 77K/s.f	—	—
冷却方法	LN2浸漬	伝導冷却	Heガス併用の伝導冷却	伝導冷却	伝導冷却	伝導冷却

図表 70

機器開発の中の共通技術：各種機器（2）

	superconducting magnetic spectrometer [AP54]	superconducting magnetic spectrometer [AP54]
仕様	100TVの荷電粒子の測定	左記の1/3サイズのデモコイル
コイルタイプ	トロイダル：12個のレーストラックコイルパッケージ 1パッケージ：2コイル	トロイダル：12個のレーストラックコイルパッケージ 1パッケージ：2コイル
コイル仕様	トロイダルの ϕ in = 500mm ϕ out = 2000mm レーストラックの Wout= 640mm Hout = 1600mm	レーストラックの Wout= 280mm Hout = 560mm
線材長	62 km	1km
lop	lop=2052A at 20K	lop=1680A at 4.2K
lc	—	—
冷却方法	伝導冷却	LH2?

機器開発の中の共通技術：MgB₂応用回転機（1）

図表 71

プロジェクト名等	ニーズとしての線材技術			導体技術	コイル技術	HTS冷却技術	
SUPRAPOWER (風力用, 界磁超伝導) (10MW機MgB ₂ コイル・冷却の要素試験) [AP55]	• Columbus	• w3 mm x t0.7 mm 安定化銅含む	• 安定化銅： 200 μm	• Ic 160 A • Je 76 A/mm ² @20 K, 1.37 T	• 単線 • 運転電流： DC 95 A @20 K, 1.37 T	• レーストラック型 • 9DP積層 • 622 mm×185 mm • 145ターン/DP • 線材長：356 m/DP	• 20 K • 冷凍機伝導冷却 • 回転子を低温部に配置 • 冷凍機ヘッドは回転子とともに回転
INNWIND (風力用, 界磁超伝導) (10MW機MgB ₂ コイルの試作) [AP56]	• Columbus • 線材コスト 18 k€ (4€/m)	• w3 mm x t0.7 mm 安定化銅含む	• 安定化銅： 200 μm	• Ic 235 A • Je 112 A/mm ² @20 K, 1.8 T	• 単線 • 運転電流： DC 225 A @ 12 K, 2.8 T	• レーストラック型 • 10DP積層 • 500 mm×300 mm • 208ターン/DP • 線材長：450 m/DP	• 20 K • 冷凍機伝導冷却
Changwon National University (Korea) (風力用, 界磁超伝導) (4MW機 MgB ₂ と YBCOで検討, 比較) [AP57]	• Columbus • 線材コスト MgB ₂ : 10 \$/m YBCO: 50 \$/m	• w3 mm x t0.7 mm 安定化銅含む	• 安定化銅： 200 μm	• Ic 161 A • Je 76 A/mm ² @20 K, 2.6 T	• 単線 • 運転電流： DC 113 A @ 20 K, 2.6 T	• レーストラック型 • 3DP積層 • 910 mm×550 mm • 300ターン/DP • 線材長：56 km	• 20 K
東大/寺尾先生 (航空機用モータ検討) (YBCO, MgB ₂) 16.3 kW/kg @5 MW [AP58]	• YBCO回転子 仮定 J 170 A/mm ²	• MgB ₂ 固定子 仮定 単線		• MgB ₂ 固定子 AC 166 Hz ? A @ 20 K	• サドル型	• 20 K • 液体水素冷却	
	線径0.8 mm フィラメント径26 μm ツイストピッチ25 mm	安定化銅 15%	Jc 1,780 A/mm ² @ 20 K, 2.0 T				
S. S. Kalsi et al. (航空機用モータ検討) (26.9 kW/kg @ 3.5MW) [AP59]	• REBCO回転子 仮定 CORC 線幅 2 mm ケーブル径 3.3 mm	• MgB ₂ 固定子 仮定 40本撚線		• 撚線導体：40素線 AC 150 Hz 920 A @ 20 K, 0.7 T	• サドル型	• 20 K	
	線径0.32 mm フィラメント径10 μm ツイストピッチ 不明	安定化銅 不明	Jc 5,400 A/mm ² @ 20 K, S.F.				

機器開発の中の共通技術：MgB₂応用回転機（2）

風力発電用

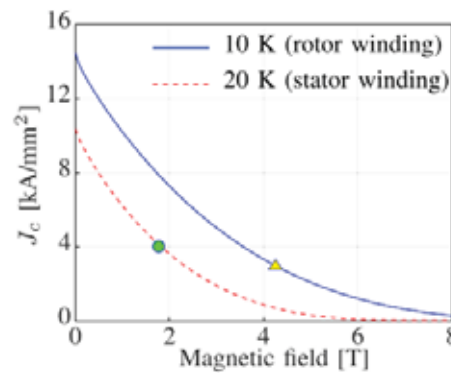
SUPRAPOWER [AP55]



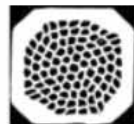
INNWIND [AP56]



EolSupra20 project [AP60]



(a) Rotor



(b)



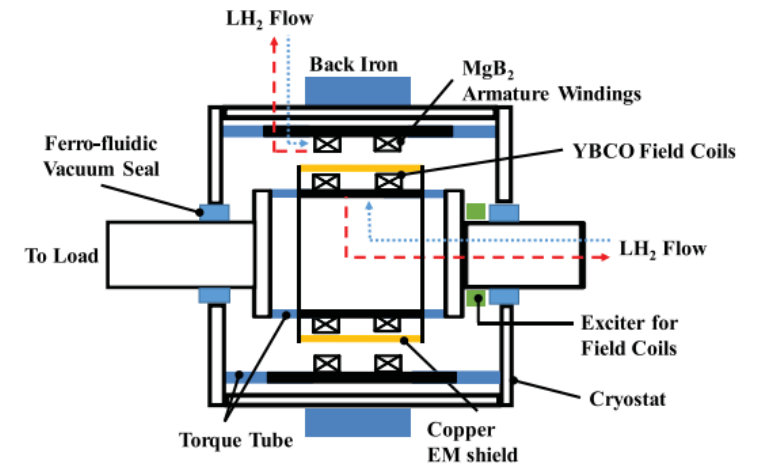
500 μm

(c) Stator (b)を(c)状に

超電導で拓くカーボンニュートラル社会

航空機用

東大寺尾 [AP61]



冷却技術 液体水素冷却 MgB₂コイル

JST/ALCA [AP62]



機器開発の中の共通技術：MgB₂応用MRIマグネット（1）

図表 73

プロジェクト名等	ニーズとしての線材技術			導体技術	コイル技術	HTS冷却技術	
MR Open (0.5 T) (オープン型) (ASG 市販品) [AP63, AP64]	• Columbus	• w3.6 mm x t0.65 mm	• 安定化銅： 16.7%	• Ic 168 A • Je 72 A/mm ² @20 K, 1 T	• 単線 • 運転電流： DC 90 A @18 K, 1.3 T	• ダブルパンケーキ x 2 • 内径1.3 m 外径1.6 m • 線材長：18 km (加工単位長 1.6 km)	• 18 K • 冷凍機伝導冷却
日立 試作機 (0.4 T) (オープン型) [AP65]	• 日立	• 線径0.81 mm	• 安定化銅	• Ic 309 A • Je 594 A/mm ² @15 K, 2.7 T	• 単線 • 運転電流： DC 168 A @15 K, 1.45 T	• ソレノイドコイル x 2 • 直径1.1 m • 線材長：1.7 km x 2本	• 15 K (代表値) • 冷凍機伝導冷却
MIT 試作機 (1.5 T) (指用) (永久電流運転) [AP66]	• 日立	• 線径0.64 mm	• 安定化銅	• Ic 230 A • Je 718 A/mm ² @15 K, 2.2 T	• 単線(単芯) • 運転電流： DC 105 A @10-15 K, 2.2 T	• ソレノイドコイル • 内径120 mm 外径170 mm • 線材長：1.3 km • PCSも一条で巻線	• 10-15 K • 冷凍機伝導冷却 • 固体窒素による蓄冷 • PCS断熱
Case Western Reserve Univ. (1.5 T 検討) [AP67]	• HyperTech	• w1.81 mm x t1.19 mm	• 安定化銅	• Ic 447 A • Je 207 A/mm ² @10 K, 2.68 T	• 単線 • 運転電流： DC 251 A @10 K, 2.68 T	• ソレノイドコイル x 8 • 直径1~2 m • 線材長：59 km	• 10 K • 冷凍機伝導冷却
Ohio State Univ. (3 T 検討) (ショートア 1.37 m) [AP68]	• HyperTech ただし20 K のIcに根拠なし	• w1.81 mm x t1.19 mm	• 安定化銅	• Ic 400 A • Je 186 A/mm ² @20 K, 6.54 T	• 単線 • 運転電流： DC 270 A @20 K, 6.54 T	• ソレノイドコイル x 9 • 直径0.7~2 m • 線材長：約100 km	• 20 K • 冷凍機伝導冷却

現ASG社MgB₂unitは旧名Columbusと記載

機器開発の中の共通技術：MgB₂応用MRIマグネット（2）

図表 74

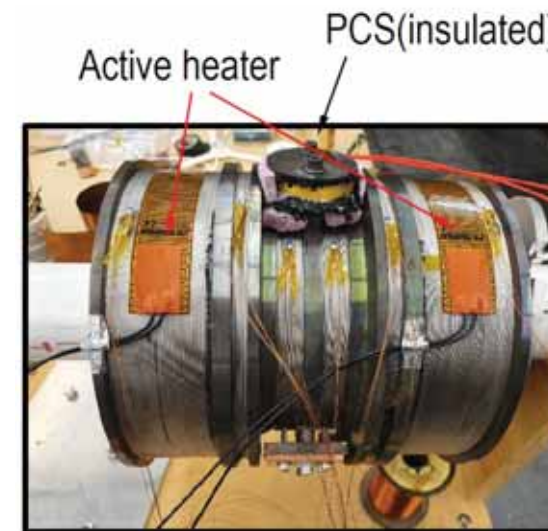
ASG [AP69]



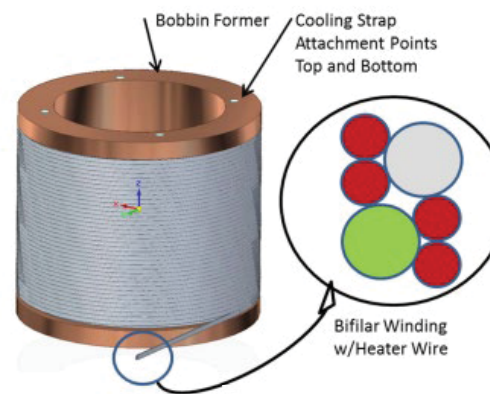
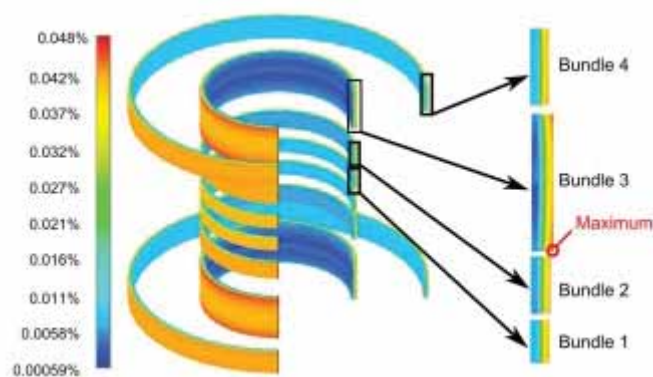
日立 [AP65]



MIT [AP66]

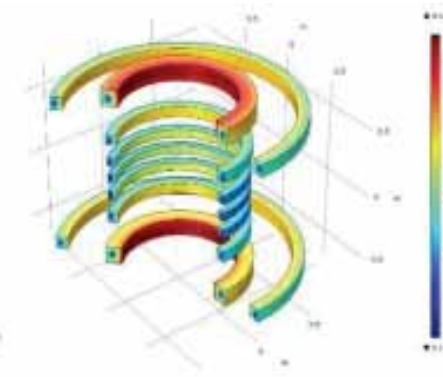


Case Western Reserve Univ. [AP67]



PCSには
ヒータ線
を共巻

Ohio State Univ. [AP68]



線材技術 参考文献 (1)

- [WT1] SEIテクニカルレビュー第197号 (2020年7月)
- [WT2] InnoSTホームページ <http://www.innost.com/>
- [WT3] R. Bjoerstad et al., SUST 28, 062002 (2015)
- [WT4] M. Brown et al., IEEE TAS 29, 6400504 (2019)
- [WT5] M. Brown et al., IOP Conf. Ser.: Mater. Eng. 279, 012022 (2017)
- [WT6] J. Qin et al., IEEE TAS 26, 8401005 (2016)
- [WT7] https://www.fujikura.co.jp/products/newbusiness/superconductors/01/2052502_12679.html
- [WT8] <https://www.superpower-inc.com/specification.aspx>
- [WT9] <https://www.nature.com/articles/s41598-021-81559-z>
- [WT10] <http://www.shsctec.com/file/d/shouyeanner/20210223/202102231404184334.pdf>
- [WT11] https://conference-indico.kek.jp/event/62/contributions/1246/attachments/837/879/KEK_WS_SuNAM_Lee_rev.pdf
- [WT12] <https://indico.cern.ch/event/1032199/contributions/4359092/attachments/2255357/3826776/THEVA%20%40%20CERN%20roadmap%20workshop%20010621.pdf>
- [WT13] <https://conference-indico.kek.jp/event/62/contributions/1243/>
- [WT14] M. Modica et al., IEEE TAS 17, 2196-2199 (2007)
- [WT15] M. Razeti et al., IEEE TAS 18, 882-886 (2008)
- [WT16] Company presentation 11 Sept 2015 (Columbus Superconductors)
- [WT17] P. Kováč et al., IEEE TAS 25, 6200607 (2015)
- [WT18] M. Wozniak et al., IEEE TAS 27, 5201105 (2017)
- [WT19] K. Konstantopoulou et al., SUST 29, 084005 (2016)

線材技術 参考文献 (2)

- [WT20] K. Konstantopoulou et al., SUST 32, 085003 (2019)
- [WT21] <https://snf.ieeecsc.org/sites/ieeecsc.org/files/documents/snf/abstracts/1S-p02%20MgB2%20Grasso%20Presentation.pdf>
- [WT22] MT20 Columbus社(ASG社)ポスター
- [WT23] M. D. Sumption et al., IEEE TAS 17, 2286-2290 (2007)
- [WT24] E. A. Young et al., IEEE TAS 25, 4600105 (2015)
- [WT25] P. Kováč et al., SUST 26, 105028 (2013)
- [WT26] C. Zhou et al., SUST 27, 075002 (2014)
- [WT27] D. Zhang et al., SUST 31, 085013 (2018)
- [WT28] HyperTech社プレゼンテーション 例えばCEC-ICMC 2015 Presentation
- [WT29] H. Tanaka et al., IEEE TAS 30, 6200105 (2020)
- [WT30] H. Tanaka et al., In-situ 法 MgB₂超伝導線材の開発、低温工学 56 巻 6 号 2021 年
- [WT31] H. Tanaka et al., IEEE TAS 32, 6200205 (2022)
- [WT32] J. H. Choi et al., Overview of MgB₂ wires fabricated by Sam Dong Co., Ltd., 低温工学 56 巻 6 号 2021 年
- [WT33] F. Wan et al., IEEE TAS 27, 6200105 (2017)
- [WT34] P. Kováč et al., SUST 35, 055004 (2022)
- [WT35] H Tanaka, et al. : Abstracts of CSSJ Conference Vol.103 (2022) p.61
- [WT36] A. Yamamoto, 粒子加速器に於けるMgB₂応用の進展、低温工学 56 巻 6 号 2021 年
- [WT37] <https://hrcak.srce.hr/file/383306>
- [WT38] P. Gao et al., Nucl. Fusion 62, 056014 (2022)
- [WT39] X. F. Pan et al., IEEE TAS 27, 6201005 (2017)
- [WT40] Robinson Research Institute - Victoria University of Wellington, High-temperature superconducting wire critical current database
<https://htsdb.wimbush.eu/>

集合導体技術 参考文献 (1)

- [AC1] D. C. van der Laan et al., SUST 32, 033001 (2019) (Topical Review of CORC cable/wire)
- [AC2] Courtesy of D. C. van der Laan, Advanced Conductor Technologies LLC (CORC)
- [AC3] Courtesy of Z Jiang, Victoria University of Wellington (Roebel cable)
- [AC4] M. Takayasu et al., IEEE TAS 23, 4800104 (2013) (TSTC)
- [AC5] S. Kar et al., SUST 31, 04LT01 (2018) (STAR wire) (STAR wire)
- [AC6] F. Gömöry et al., IEEE TAS 27, 4600305 (2017) (CORT cable)
- [AC7] D. C. van der Laan et al., SUST 33, 044001 (2020) (CORC wire with $J_e > 650 \text{ A/mm}^2$)
- [AC8] N. Amemiya et al., SUST 35, 025003 (2022) (SCSC cable)
- [AC9] M. Shigemasa et al., IEEE TAS 32, 8200806 (2022) (SCSC cable)
- [AC10] 京都大学プレスリリース, 2021年11月16日, <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-11-16-0> (SCSC cable)
- [AC11] T. Mulder et al., IEEE TAS 26, 4803605 (2016) (CORC CICC)
- [AC12] T. Mulder et al., IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 279, 012033 (2017) (CORC CICC)
- [AC13] T. Mulder, PhD Dissertation, University of Twente (CORC CICC)
- [AC14] W. Goldacker et al., SUST 27, 093001 (2014) (Roebel cable review)
- [AC15] R. Badcock et al., IEEE TAS 19, 3244 (2009) (Roebel cable)
- [AC16] S. I. Schlachter et al., IEEE TAS 21, 3021 (2011) (CCRC)
- [AC17] M. J. Wolf et al., IEEE TAS 26, 6400106 (2016) (CroCo)
- [AC18] Y. Wang et al., IEEE TAS 26, 4804406 (2016) (Q-IS conductor)
- [AC19] T. Mito et al., J. of Phys. Commun. 4 035009 (2020) (FAIR conductor)
- [AC20] G. Celentano et al., IEEE TAS 24, 4601805 (2014) (Twisted stack HTS CICC, ENEA)

集合導体技術 参考文献 (2)

- [AC21] D. Uglietti et al., SUST 28, 124005 (2015) (Flat REBCO CICC)
- [AC22] Z. S. Hartwig et al., SUST 33, 11LT01 (2020) (VIPER)
- [AC23] R. Slade et al., “5. REBCO magnet technology—a key enabling technology for compact fusion devices” in N. Mitchell et al., SUST 34, 103001 (2021) (Cable by Tokamak Energy)
- [AC24] F. Borgnolutti et al., IEEE TAS 26, 4602605 (2016) (EuCARD insert cable, CEA)
- [AC25] Y. Terazaki et al., JoP: Conf. Series 871, 012099 (2017) (STARS conductor)
- [AC26] C. Vorpahi and V. Corato “3. The DEMO magnet system: unifying mature technology and innovation” in N. Mitchell et al., SUST 34, 103001 (2021) (a CS conductor design)
- [AC27] S. Matsunaga et al., IEEE TAS 30, 4601405 (2020) (WISE conductor)
- [AC28] K. Konstantopoulou IEEE TAS 29, 4802205 (2019)
- [AC29] 谷貝他 低温工学 56, 269 (2021)
- [AC30] P. Gao et al., Nucl. Fusion 62 (2022) 056014

コイル 参考文献

- [CO1] 柳本, 「船舶推進器用高温超電導モータの実用化に関する研究」, 博士学位論文, 東京海洋大, 2017
- [CO2] K. Koyanagi et al., IEEE TAS 22, 4101904 (2012)
- [CO3] Y. Iwami, J. Phys.: Conf. Ser. 1559, 012147 (2020)
- [CO4] D. N. Diev et al., IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. 502 012105 (2019)
- [CO5] 高山他, 低温工学 52, 234 (2017)
- [CO6] K. Koyanagi et al., IEEE TAS 23, 4100404 (2013)
- [CO7] D. C. van der Laan et al., SUST 32, 033001 (2019)
- [CO8] Displayed at PSFC/MIT, Courtesy of Z. Hartwig
- [CO9] N. D. Glasson et al., IEEE TAS 23, 5500206 (2013)
- [CO10] J. van Nugteren et al., SUST 31, 065002 (2018)

超電導導体概念設計 参考文献

[CD1] 上之藺 博 編著, 「超電導発電機」, オーム社, 2004

冷却技術 参考文献 (1)

- [CR1] S. Yokoyama et al., IEEE TAS 30, 4400904 (2020)
- [CR2] B. J. Parkinson et al., SUST 30, 125009 (2017)
- [CR3] W. Stautner et al., IEEE TAS 19, 2297-2300 (2009)
- [CR4] J. Ling et al., SUST 30, 024011 (2017)
- [CR5] M. P. Oomen et al., IEEE TAS 16, 1519-1522 (2006)
- [CR6] 白井 康之, 塩津 正博, 低温工学 55, 44-52 (2020)
- [CR7] B. Gamble et al., IEEE TAS 21, 1083-1088 (2011)
- [CR8] A. Chen et al., IEEE TAS 22, 4701304 (2012)
- [CR9] M Iwakuma et al., IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 101, 012026 (2015)
- [CR10] 上岡 泰晴, 低温工学 49, 287-294 (2014)
- [CR11] J. Park et al., IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 502, 012140 (2019)
- [CR12] M. Takahashi et al., IEEE TAS 27, 4603805 (2017)
- [CR13] K. Yamaguchi et al., International Journal of Thermal Sciences 142 258-265 (2019)
- [CR14] 槇田 康博 他, 低温工学 57, 241-245 (2022)
- [CR15] N. Hirano et al., IEEE TAS 31, 0600104 (2021)
- [CR16] W Stautner, IWC-HTS, 10/14-16/2015, Matsue, Japan
- [CR17] 太陽日酸ウェブサイト <https://www.tn-sanso.co.jp/jp/index.html>
- [CR18] 前川製作所ウェブサイト <http://www.mayekawa.co.jp/ja/>
- [CR19] 社団法人低温工学協会編, 「超伝導・低温工学ハンドブック」, オーム社 (1993)

冷却技術 参考文献（2）

- [CR20] 超電導発電関連機器・材料技術研究組合編集兼発行, 「Super-GM Review総括版」(1999)
- [CR21] 上之菌 博 編著, 「超電導発電機」, オーム社, 2004
- [CR22] 「超電導発電関連機器・材料技術のフィージビリティ調査研究 昭和61年度報告書 周辺機器及び関連技術WG編」, テクノバ(1987)
- [CR23] 低温工学ハンドブック, p.212, 内田老鶴圃新社(1982)
- [CR24] 低温工学協会関西支部 低温データ研究会, 低温工学データ集, I-23(1997)
- [CR25] 佐藤 新太郎, 「超臨界ヘリウムによる冷却」, 低温工学 7, 197-202(1972)

機器開発の中の共通技術 参考文献 (1)

- [AP1] X. Song et al., IEEE Trans. Energ. Conv. 34, 2218 – 2225 (2019)
- [AP2] A. Bergen et al., SUST 32, 125006 (2019)
- [AP3] T. Winkler, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 502, 012004 (2019)
- [AP4] M. Bauer, 26th International Conference on Magnet Technology, Thu-Mo-Or18-01, 2019
https://indico.cern.ch/event/763185/contributions/3415642/attachments/1916178/3167986/2019-09-26_MT26_Ecoswing_Bauer.pdf
- [AP5] T. Miller, 2019 European Cryogenic Days, 2019.
https://indico.esss.lu.se/event/1176/contributions/9635/attachments/9505/15041/20191002_EcoSwing_Sumitomo_Cryocooling_FINAL.pdf
- [AP6] M. Dhalle, <https://www.4tu.nl/htm/joint-materials-science-activities/joint-workshops/dhalle-4tuhtm-m2i-2020materialsforenergy.pdf>
- [AP7] S. Sanz, et al., IEEE TAS 26, 5201605 (2016)
- [AP8] G. Sarmiento, et al., IEEE TAS 26, 5203006 (2016)
- [AP9] I. Marino, et al., SUST 29, 024005 (2016)
- [AP10] J. Sun, et al., IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 101, 012088 (2015)
- [AP11] J. Sun, et al., IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 278, 012067 (2017)
- [AP12] J. Sun, et al., IEEE TAS 28, 5201105 (2018)
- [AP13] X. Song, et al., IEEE TAS., 27, 5201105 (2017)
- [AP14] N. Magnusson et al., IEEE TAS 28, 5207105 (2018)
- [AP15] F. Schreiner, et al., IEEE TAS 30 6900205 (2020)
- [AP16] F. Schreiner et al., IEEE TAS 31 5202405 (2021)

機器開発の中の共通技術 参考文献（2）

- [AP17] K L Kovalev, et al., IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87, 032018 (2017)
- [AP18] 柳本俊之, 「船舶推進器用高温超電導モータの実用化に関する研究」, 博士学位論文, 東京海洋大, 2017
- [AP19] E.Ueno et al., Physica C 504, 111-114 (2014)
- [AP20] B. Gamble et al., IEEE TAS 21, 1083-1086 (2011)
- [AP21] H. Moon et al., IEEE TAS 26, 5203805 (2016)
- [AP22] D Sugyo et al., J. Phys.: Conf. Ser. 97 012287
- [AP23] Q. Wu, et al., IEEE TAS 30, 4900805 (2020)
- [AP24] Q. Wu, et al., IEEE TAS 31, 5201805 (2021)
- [AP25] M. K. Al-Mosawi et al., IEEE TAS 15, 2182-2185 (2005)
- [AP26] H. Wen, et al., IEEE TAS 19, 1652-1655 (2009)
- [AP27] S. S. Kalsi et al., IEEE TAS 31, 5206807 (2021)
- [AP28] S. Fukuda et al., IEEE TAS 28, 5207806 (2018)
- [AP29] K. Funaki et al., IEEE TAS 11, 1568-1571 (2001)
- [AP30] Y. Ohtsubo et al., IEEE TAS 25, 5500305 (2015)
- [AP31] N. D. Glasson et al., IEEE TAS 23, 5500206 (2013)
- [AP32] N. D. Glasson et al., IEEE TAS 21, 1393-1396 (2011)
- [AP33] E. Pardo et al., SUST 28, 114008 (2015)
- [AP34] M. Staines et al., SUST 25, 014002 (2012)
- [AP35] H. Kamijo et al., IEEE TAS 15, 1875-1888 (2005)
- [AP36] X. Li et al., IEEE TAS 29 5501905 (2019)

機器開発の中の共通技術 参考文献 (3)

- [AP37] P.C. Michael, et al., IEEE TAS 29, 4300706 (2019)
- [AP38] R.A. Slade, et al., IEEE TAS 24, 4400705 (2014)
- [AP39] S. Yokoyama, et al., IEEE TAS 30, 4400904 (2020)
- [AP40] S. Hahn, et al., IEEE TAS 24, 4300805 (2014)
- [AP41] S. Iwai, et al., IEEE TAS 32, 4605705 (2022)
- [AP42] G. Ambrosio, et al., arXiv:2203.13985.
- [AP43] R. Gupta, Design, IEEE TAS 28, 4002305 (2018)
- [AP44] J. Nugteren, et al., SUST 31, 065002 (2018)
- [AP45] M. Dam, et al., SUST 33, 044012 (2020)
- [AP46] X. Wang, et al., SUST 32, 075002 (2019)
- [AP47] A. Godeke, et al., IEEE TAS 25, 4002404 (2015)
- [AP48] M. Moyzykh et al., IEEE TAS 31, 5601707 (2021)
- [AP49] Y. Xia et al., IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. 768 062096 (2020)
- [AP50] S. Mukoyama et al., IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 871 012090 (2017)
- [AP51] V. Q. Dao et al., IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1054 012071 (2018)
- [AP52] L. Hu et al., IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. 768 022054 (2020)
- [AP53] D. N. Diev et al., IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. 502 012105 (2019)
- [AP54] M. Dam et al., SUST 33 044012 (2020)
- [AP55] G. Sarmiento et al., IEEE TAS 26, 5203006 (2016)
- [AP56] N. Magnusson et al., IEEE TAS 28, 5207105 (2018)

機器開発の中の共通技術 参考文献（４）

- [AP57] G. Nam et al., IEEE TAS 28, 5205605 (2018)
- [AP58] Y. Terao et al., IEEE TAS 28, 5208005 (2018)
- [AP59] S. S. Kalsi et al., IEEE TAS 31, 5206807 (2021)
- [AP60] T. Hoang, et al., IEEE TAS 28, 5206705 (2018)
- [AP61] Y. Terao et al., IEEE TAS 29, 5202305 (2019)
- [AP62] Y. Iwami, J. Phys.: Conf. Ser. 1559, 012147 (2020)
- [AP63] M. Modica et al., IEEE TAS 17, pp. 2196-2199 (2007)
- [AP64] M. Razeti et al., IEEE TAS 18, pp. 882-886, (2008)
- [AP65] H. Tanaka et al., In-situ 法 MgB₂超伝導線材の開発、低温工学 56 巻 6 号 2021 年
- [AP66] D. Park et al., IEEE TAS 30, 4401505 (2020)
- [AP67] T. Baig et al., SUST 30, 043002 (2017)
- [AP68] M. Majoros et al., IEEE TAS 32, 4400104 (2022)
- [AP69] <https://www.asgsuperconductors.com/progetto/mropen>

一般社団法人 産業競争力懇談会（COCN）

〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-1

日本プレスセンタービル 6階

Tel : 03-5510-6931 Fax : 03-5510-6932

E-mail : jimukyoku@cocn.jp

URL : <http://www.cocn.jp/>

事務局長 山口雅彦