

【産業競争力懇談会 2021年度 プロジェクト 中間報告】

【浮体式原子力発電所】

2021年10月15日

産業競争力懇談会 **COCN**

【エクゼクティブサマリ（中間）】

1. 本プロジェクトの基本的な考え方

世界各国で気候変動問題への対策の実践が求められる中、我が国においても、2050年カーボンニュートラルが宣言され、これを踏まえたグリーン成長戦略が策定されている。グリーン成長戦略では、安全性に優れた次世代原子炉開発が重要分野の一つとして掲げられており、東京電力福島第一原子力発電所事故の経験を踏まえて安全性を向上させた原子力発電の提案そして開発が必要である、その一つとして、マサチューセッツ工科大学（MIT）の Michael Golay 教授らが提唱する Offshore Floating Nuclear Power（浮体式原子力発電）が挙げられる。この浮体式原子力発電は、図に示すように、円筒型の浮体構造体と原子炉を組合せて沿岸から数十 km 沖合の洋上に浮体させるものであり、以下に示す 4 点の長所を有しており、産業競争力の観点からも有望な原子力発電である。

浮体式原子力発電の長所

- ① 津波の影響を小さくできる
- ② 原子炉からの崩壊熱除去のために、周辺にある大量の海水を動力なしに利用できる
- ③ 陸地から離れた沖合に設置することで事故時の住民避難が不要になる
- ④ 集中した製造拠点で製造することで品質向上が図れる

上記に示した浮体式原子力発電の優れた安全性に着目し、「浮体式原子力発電研究会」を産学連携で 2020 年度に立ち上げ、浮体式原子力発電の持つ安全性向上の可能性を確認するとともに、その実現のために必要となる検討課題を整理し、それらの中から、重要性の高い 4 つの検討課題（①規制要求に照らした課題抽出、②海上での地震動（海震）の影響、③沸騰水型原子炉（BWR）における浮体揺動影響、④PRA を用いた安全性向上度の推定）に取り組んだ。2021 年度も浮体式原子力発電の実現に向けた検討を実施する本プロジェクトを立ち上げた。

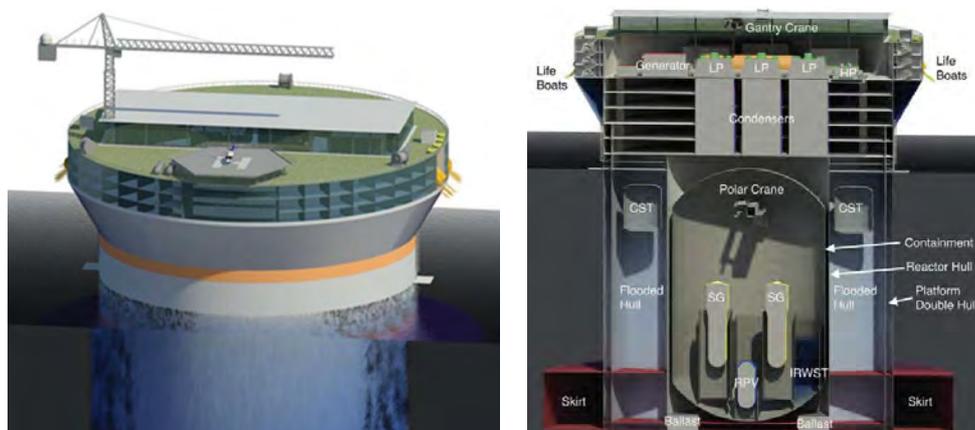


図 MIT が提案する浮体式原子力発電（OFNP）

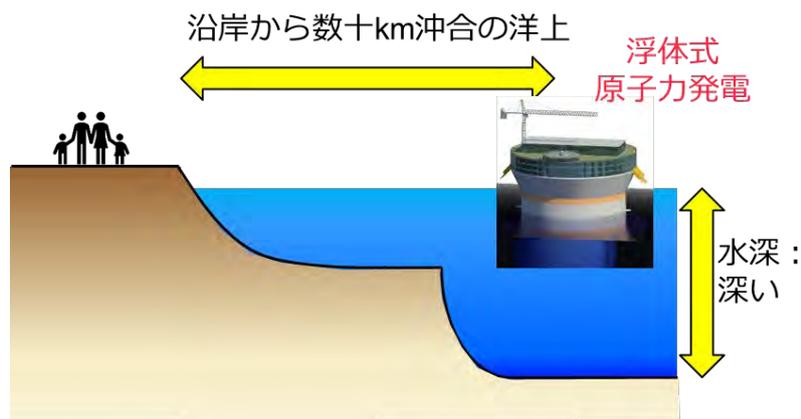


図 浮体式原子力発電の立地イメージ

2. 検討の視点と範囲

本プロジェクトでは、浮体式原子力発電の実現に向けた検討として、5つの観点（浮体式原子力発電の実現、浮体式原子力発電の長所、陸上の原子力発電との相違、既設炉からの更なる安全性向上、浮体式原子力発電関連の知見収集）から15の検討事項（表参照）を設定し、検討することとした。なお、表のNo.3で検討するレイアウト検討の炉型については、MITのMichael Golay教授らが加圧水型原子炉（PWR）のレイアウトを既に検討しているため、沸騰水型原子炉（BWR）を選択した。また、表のNo.5、6、10、12～14についても、レイアウト検討の炉型としてBWRを選択したことから、BWRに関する検討を中心に進めている。

表 検討事項一覧

No.	検討の観点	検討事項
1	浮体式原子力発電 の実現	浮体式原子力発電の実現までの概略スケジュール
2		浮体式原子力発電の建設コスト（概算）の把握
3		浮体式原子力発電（炉型：BWR）のレイアウト検討（概念設計レベル）
4		国際連携の枠組み作りに向けた活動
5	浮体式原子力発電 の長所	海水を活用した静的な崩壊熱除去システムの成立性検討
6		浮体式原子力発電の安全性・過酷事故評価の簡易検討
7	陸上の原子力発電 との相違	浮体式原子力発電の保守実施場所
8		長期間の運用を考慮した浮体構造物の設計・保守
9		浮体式原子力発電に適した位置保持技術
10		浮体揺動におけるBWR成立性の評価
11		ロンドン条約・議定書への対応
12	既設炉からの 更なる安全性向上	原子炉減圧機能の多様化
13		過酷事故時の原子炉水位計測手法の多様化

No.	検討の観点	検討事項
14		効率的な燃料交換システム・使用済み燃料プールのスロッシング対策
15	浮体式原子力発電関連の知見収集	浮体式原子力発電関連の知見収集

3. 産業競争力強化のための提言および施策

最終報告書に向け、提言および施策についても検討している段階であるが、現時点の提言として、以下の4点について産官学が一体となって取り組むことが挙げられる。

- ・ 産業界は、浮体式原子力発電の設計の具体化、安全性高度化を推進する組織を構築する。
- ・ 学会は、浮体式原子力発電技術から派生する研究開発を活性化し人材育成につなげる。
- ・ 国は、国際的な協力体制の構築を図る。
- ・ 規制当局は、浮体式原子力発電による、安全性向上のための意見交換の場を作ること。

4. 最終報告書に向けた検討上の課題と展開

本プロジェクトでは、前述の通り、5つの観点（浮体式原子力発電の実現、浮体式原子力発電の長所および課題、陸上の原子力発電との相違、既設炉からの更なる安全性向上、浮体式原子力発電関連の知見収集）から15の検討事項を設定し、最終報告書に向け検討を進めている。

【目次】

【プロジェクトメンバー】	2
1. 本プロジェクトの背景・目的	5
1.1. 本プロジェクトの背景	5
1.2. 本プロジェクトの目的	6
2. 本プロジェクトの進め方	7
3. 浮体式原子力発電の実現に向けた検討の進捗状況	10
3.1. 浮体式原子力発電の実現までの概略スケジュール	10
3.2. 浮体式原子力発電の建設コスト（概算）の把握	10
3.3. 浮体式原子力発電（炉型：BWR）のレイアウト検討（概念設計レベル）	10
3.4. 国際連携の枠組み作りに向けた活動	10
4. 浮体式原子力発電の長所に関する検討の進捗状況	12
4.1. 海水を活用した静的な崩壊熱除去システムの成立性検討	12
4.2. 浮体式原子力発電の安全性・過酷事故評価の簡易検討	12
5. 陸上の原子力発電との相違に関する検討の進捗状況	13
5.1. 浮体式原子力発電の保守実施場所	13
5.2. 長期間の運用を考慮した浮体建造物の設計・保守	13
5.3. 浮体式原子力発電に適した位置保持技術	14
5.4. 浮体揺動における BWR 成立性の評価	14
5.5. ロンドン条約・議定書への対応	15
6. 既設炉からの更なる安全性向上に関する検討の進捗状況	18
6.1. 原子炉減圧機能の多様化	18
6.2. 過酷事故時の原子炉水位計測の多様化	18
6.3. 効率的な燃料交換システム・使用済み燃料プールのスロッシング対策	18
7. 浮体式原子力発電関連の知見収集に関する検討の進捗状況	20
8. 産業競争力強化のための提言および施策	21
9. 最終報告書に向けた検討上の課題と展開	21

【プロジェクトメンバー】

リーダー	姉川 尚史	(東京電力ホールディングス株式会社)
メンバー	中西 大介	(東芝エネルギーシステムズ株式会社)
	青木 保高	(東芝エネルギーシステムズ株式会社)
	安達 弘幸	(東芝エネルギーシステムズ株式会社)
	須磨 桂一	(東芝エネルギーシステムズ株式会社)
	長島 慶典	(東芝エネルギーシステムズ株式会社)
	松村 和彦	(日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社)
	Antonin Povolny	(日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社)
	安田 賢一	(日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社)
	上遠野 健一	(日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社)
	有田 誠二	(三菱重工業株式会社)
	田中 太一	(三菱重工業株式会社)
	伊地知 雅典	(株式会社 IHI)
	小池 大介	(株式会社 IHI)
	鈴木 清照	(株式会社三菱総合研究所)
	藤山 翔乃	(株式会社三菱総合研究所)
	川合 康太	(株式会社三菱総合研究所)
	森山 善範	(鹿島建設株式会社)
	門馬 隆弘	(鹿島建設株式会社)
	小林 伸司	(清水建設株式会社)
	吉田 郁夫	(清水建設株式会社)
	黒澤 到	(清水建設株式会社)
	甲斐 修二	(清水建設株式会社)
	藤田 昭	(日揮株式会社)
	森本 泰臣	(日揮グローバル株式会社)
	田辺 雅幸	(日揮グローバル株式会社)
	岸本 直彦	(日揮グローバル株式会社)
	大和矢 秀成	(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
安食 和英	(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)	
楠 剛	(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)	
川西 智弘	(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)	
山本 智彦	(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)	
徳永 佳久	(原燃輸送株式会社)	
中島 進	(原燃輸送株式会社)	

山口 洵	(原燃輸送株式会社)
藤岡 諒	(原燃輸送株式会社)
佐脇 俊之	(日本電気株式会社)
林 真照	(三菱電機株式会社)
南 清和	(東京海洋大学)
師岡 慎一	(早稲田大学)
古谷 正裕	(早稲田大学)
小原 徹	(東京工業大学)
木倉 宏成	(東京工業大学)
相楽 洋	(東京工業大学)
櫻原 達也	(東京工業大学)
池谷 知彦	(一般財団法人電力中央研究所)
池野 正明	(一般財団法人電力中央研究所)
宇井 淳	(一般財団法人電力中央研究所)
三浦 弘道	(一般財団法人電力中央研究所)
中村 武史	(一般財団法人電力中央研究所)
村部 良和	(日本原子力発電株式会社)
谷川 明広	(日本原子力発電株式会社)
佐藤 拓	(関西電力株式会社)
菅原 淳	(関西電力株式会社)
田口 鋼志	(関西電力株式会社)
一川 倫宏	(関西電力株式会社)
岩田 直也	(関西電力株式会社)
名倉 孝訓	(中部電力株式会社)
原 哲也	(中部電力株式会社)
古塚 伸一	(一般財団法人日本原子力産業協会)
土平 広樹	(一般財団法人日本原子力産業協会)
手塚 健一	(一般財団法人エネルギー総合工学研究所)
都築 宣嘉	(一般財団法人エネルギー総合工学研究所)
木野 千晶	(一般財団法人エネルギー総合工学研究所)
後藤 章	(東京電力ホールディングス株式会社)
大森 修一	(東京電力ホールディングス株式会社)
上坂 昌生	(東京電力ホールディングス株式会社)
山田 五雪	(東京電力ホールディングス株式会社)
原 大輔	(東京電力ホールディングス株式会社)
小暮 将之	(東京電力ホールディングス株式会社)
佐々 大輔	(東京電力ホールディングス株式会社)

山本 佑 (東京電力ホールディングス株式会社)
中野 宏之 (東京電力ホールディングス株式会社)

COCN

山口 雅彦 (COCN 事務局長)
五日市 敦 (COCN 副事務局長)
佐藤 桂樹 (COCN 副事務局長)
武田 安司 (COCN 副事務局長)
岩田 一 (COCN 企画小委員)
菊地 達朗 (COCN 企画小委員)
金枝上 敦史 (COCN 企画小委員)
大久保 進之介 (COCN 企画小委員)
中山 慶祐 (COCN 企画小委員)
武田 安司 (COCN 企画小委員)

【本 文】

1. プロジェクトの背景・目的

1.1. プロジェクトの背景

気候変動問題は、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の 1.5°C 特別報告書、2021 年 8 月 9 日に公表された IPCC 第 6 次評価報告書 WG1 報告書（自然科学的根拠）の政策決定者向け要約の通り、議論の段階を越えており、世界各国で対策の実践が求められている。我が国においても、2050 年カーボンニュートラルが宣言され、これを踏まえたグリーン成長戦略が策定されている。グリーン成長戦略では、14 の重要分野ごとに目標が掲げられており、電力部門の脱炭素化のための一つとして、安全性に優れた次世代原子炉開発が挙げられている。東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえて安全性を向上させることが求められており、その一つとして、マサチューセッツ工科大学（MIT）の Michael Golay 教授らが提唱する Offshore Floating Nuclear Power（浮体式原子力発電）が挙げられる。この浮体式原子力発電は、図 1、図 2 に示すように円筒型の浮体構造物と原子炉を組合せて沿岸から数十 km 沖合の洋上に浮体させるものであり、長所として、以下に示す 4 点が挙げられる。

浮体式原子力発電の長所

- ① 津波の影響を小さくできる
- ② 原子炉からの崩壊熱除去のために、周辺にある大量の海水を動力なしに利用できる
- ③ 陸地から離れた沖合に設置することで事故時の住民避難が不要になる
- ④ 集中した製造拠点で製造することで品質向上が図れる

浮体式原子力発電は、津波の影響を小さくでき、東京電力福島第一原子力発電所事故で困難を極めた原子炉からの崩壊熱除去についても冷却水として周辺にある大量の海水を動力なしに利用できる利点を持つ。

このように放射性物質の大量拡散のリスクを大幅に抑制しているが、沖合 30km 以遠に係留すれば周辺に居住者がいないことから、住民避難が不要になる。

製造面の観点では、海に面した製造拠点（例えば、造船所）で建造し、係留場所まで海上を輸送することが可能なため、産業競争力の観点からも有望な原子力発電である。

上記に示した浮体式原子力発電の優れた安全に着目し、「浮体式原子力発電研究会」を 2020 年度に立ち上げ、浮体式原子力発電の持つ安全性向上の可能性を確認するとともに、その実現のために必要となる 111 の検討課題を整理し、それらの中から、重要度の高い 4 つの検討課題（①規制要求に照らした課題抽出、②海上での地震動（海震）の影響、③沸騰水型原子炉（BWR）における浮体揺動影響、④PRA を用いた安全性向上度の推定）に取り組んだ。2021 年度も継続して浮体式原子力発電の実現に向けた検討を実施することとし、本プロジェクトを立ち上げた。

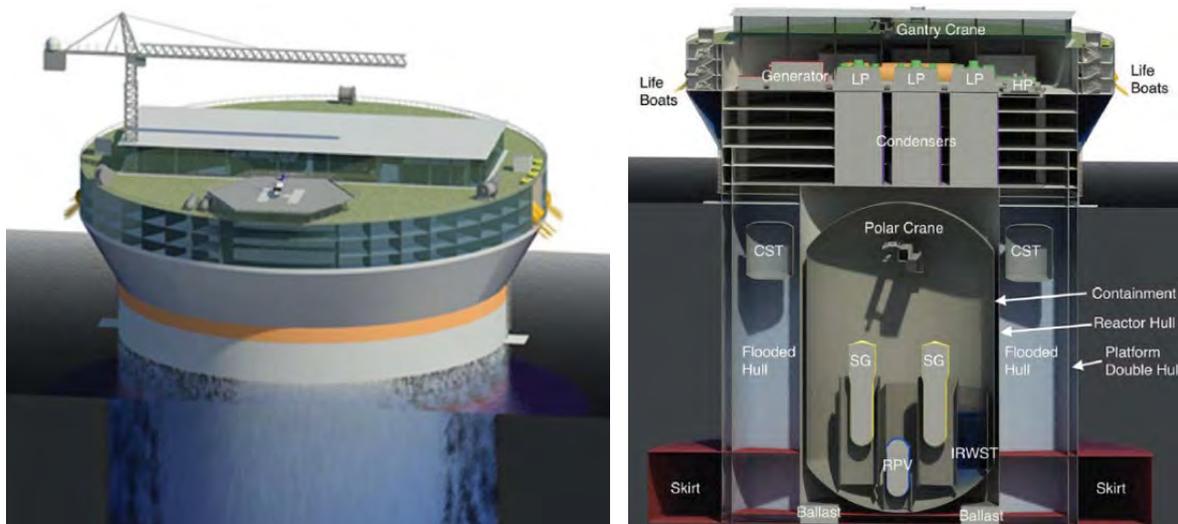


図 1 MIT の Michael Golay 教授らが提唱する浮体式原子力発電¹

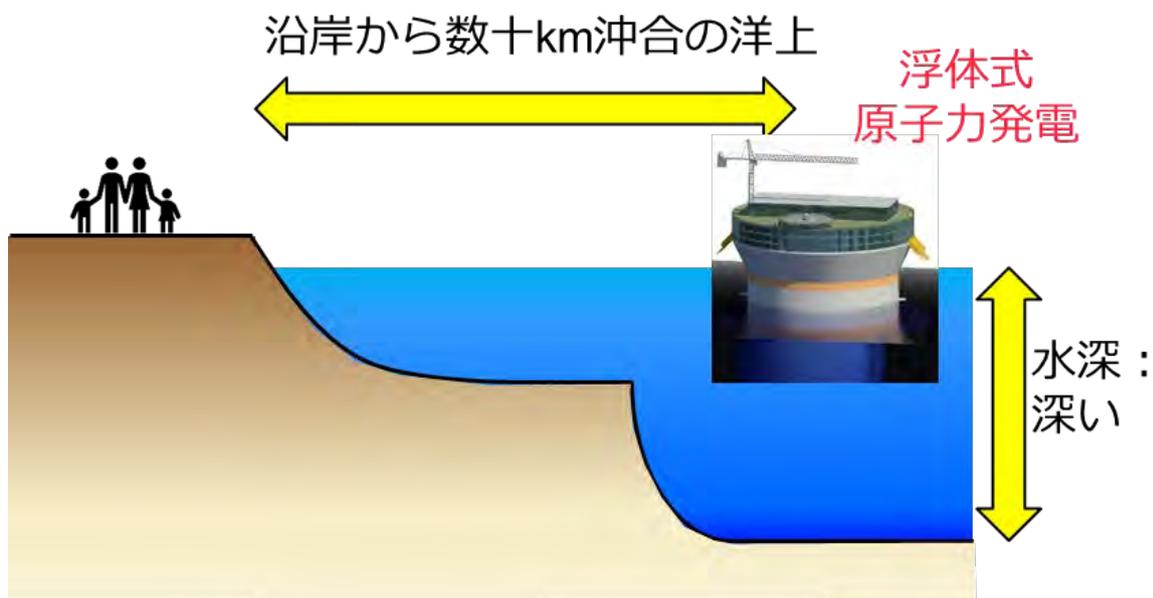


図 2 浮体式原子力発電の立地イメージ

1.2. 本プロジェクトの目的

浮体式原子力発電の長所そして課題を確認するとともに、より安全な原子力発電の実現に向けた施策を検討し、我が国への導入の必要性を明確にすることを本プロジェクトの目的とする。

¹ J. Buongiorno et al., "The Offshore Floating Nuclear Plant (OFNP) Concept," Nucl.Tech., vol.194, pp.1-14 2016.

2. 本プロジェクトの進め方

本プロジェクトでは、2020年度の浮体式原子力発電研究会内で挙げた「実現のために必要となる検討課題 111 件」の中から、早期に検討すべき課題（ただし、浮体式原子力発電研究会で検討した課題を除く）として 4 件を選定した（①浮体式原子力発電の建設コスト（概算額）の把握（表 1 の No.2）、②浮体式原子力発電の保守実施場所（表 1 の No.7）、③浮体式原子力発電に適した位置保持技術（表 1 の No.9）、および④ロンドン条約・議定書への対応（表 1 の No.11））。

加えて、5つの観点（浮体式原子力発電の実現、浮体式原子力発電の長所、陸上の原子力発電との相違、既設炉からの更なる安全性向上、浮体式原子力発電関連の知見収集）で 11 件（表 1 の No.1、3～7、10、12～15）を検討することとし、合計 15 件について検討することとした。これらを 5つの観点で整理した結果を表 1 に示す。検討事項 15 件の検討概要を以下に示す。なお、表 1 の No.3 で検討するレイアウト検討の炉型については、MIT の Michael Golay 教授らが加圧水型原子炉(PWR)のレイアウトを既に検討しているため、BWR を選択した。また、表 1 の No.5、6、10、12～14 についても、レイアウト検討の炉型として BWR を選択したことから、BWR に関する検討を中心に進めている。

■ 浮体式原子力発電の実現に向けた検討

浮体式原子力発電の実現までの概略スケジュール

- ・ 浮体式原子力発電の実現までの概略スケジュール（必要な手続き・期間等）を把握する（表 1 の No.1）。

浮体式原子力発電の建設コスト（概算）の把握

- ・ 浮体式原子力発電の建設コスト（概算額）を把握する（表 1 の No.2）。

浮体式原子力発電（炉型：BWR）のレイアウト検討（概念設計レベル）

- ・ 浮体式原子力発電の炉型として BWR を選択した場合のレイアウト（概念設計レベル）を検討する（表 1 の No.3）。

国際連携の枠組み作りに向けた活動

- ・ 浮体式原子力発電の実現に向けた国際連携の枠組み作りに向けた活動を実施する（表 1 の No.4）。

■ 浮体式原子力発電の長所に関する検討

海水を活用した静的な崩壊熱除去システムの成立性検討

- ・ 浮体式原子力発電の長所として、海水を活用した静的な安全系²が挙げられる。この成立性について検討する（表 1 の No.5）。

浮体式原子力発電の安全性・過酷事故評価の簡易検討

- ・ 海水を活用した静的な安全系が設置されていることを考慮した場合の安全性・過酷事故評価について簡易的な検討を実施する（表 1 の No.6）。

² 静的な安全系とは、改良型沸騰水型軽水炉（ABWR）等で採用されていた動的機器を用いた安全系と異なり、電源を必要とせず、自然力（例えば、重力）を用いて炉心の崩壊熱等を除去できる安全系を指す。

■ 陸上の原子力発電との相違に関する検討

浮体式原子力発電の保守実施場所

- ・ 陸上の原子力発電と異なり、浮体式原子力発電の保守実施場所として、立地海域（洋上）と修繕ドック（陸上）が考えられるが、どちらが保守実施場所として適しているかを検討する（表 1 の No.7）。

長期間の運用を考慮した浮体構造物の設計・保守

- ・ 浮体式原子力発電特有の設備として挙げられる浮体構造物について、長期間の運用を考慮した設計・保守について検討する（表 1 の No.8）。

浮体式原子力発電に適した位置保持技術

- ・ 浮体式原子力発電に適した位置保持技術について検討する（表 1 の No.9）。

浮体揺動における BWR 成立性の評価

- ・ 浮体式原子力発電研究会で検討した「BWR における浮体揺動影響」について、継続して検討する（表 1 の No.10）。

ロンドン条約・議定書への対応

- ・ 放射性物質の海洋投棄に関する規制が定められているロンドン条約・議定書への対応について検討する（表 1 の No.11）。

■ 既設炉からの更なる安全性向上に関する検討

原子炉減圧機能の多様化

- ・ 東京電力福島第一原子力発電所事故で困難を極めた原子炉の減圧機能について、多様化させることは非常に重要なことであり、新たな方法を検討する（表 1 の No.12）。

過酷事故時の原子炉水位計測手法の多様化

- ・ 東京電力福島第一原子力発電所事故のような過酷事故時に原子炉圧力容器水位を把握することができる新たな手段を検討する（表 1 の No.13）。

効率的な燃料交換システム・使用済み燃料プールのスロッシング対策

- ・ 効率的な燃料交換システム、使用済み燃料プールのスロッシング（プールの液面が激しく揺れる現象）対策について検討する（表 1 の No.14）。

■ 浮体式原子力発電関連の知見収集

浮体式原子力発電関連の知見収集

- ・ これまでに国内外で検討された洋上の原子力発電に関する検討結果を収集する（表 1 の No.15）。

表 1 検討事項一覧

No.	検討の観点	検討事項
1	浮体式原子力発電 の実現	浮体式原子力発電の実現までの概略スケジュール
2		浮体式原子力発電の建設コスト（概算）の把握
3		浮体式原子力発電（炉型：BWR）のレイアウト検討（概念設計レベル）
4		国際連携の枠組み作りに向けた活動
5	浮体式原子力発電 の長所	海水を活用した静的な崩壊熱除去システムの成立性検討
6		浮体式原子力発電の安全性・過酷事故評価の簡易検討
7	陸上の原子力発電 との相違	浮体式原子力発電の保守実施場所
8		長期間の運用を考慮した浮体構造物の設計・保守
9		浮体式原子力発電に適した位置保持技術
10		浮体揺動における BWR 成立性の評価
11		ロンドン条約・議定書への対応
12	既設炉からの 更なる安全性向上	原子炉減圧機能の多様化
13		過酷事故時の原子炉水位計測手法の多様化
14		効率的な燃料交換システム・使用済み燃料プールのスロッシング対策
15	浮体式原子力発電 関連の知見収集	浮体式原子力発電関連の知見収集

3. 浮体式原子力発電の実現に向けた検討の進捗状況

浮体式原子力発電の実現に向けた検討として、表 1 の No.1～4 について検討している。各検討の進捗状況は以下の通り。

3.1. 浮体式原子力発電の実現までの概略スケジュール

浮体式原子力発電の実現に向け、実現までの必要な手続き、検討内容、製造工程とのおおよその期間を把握しておく必要がある。そのため、至近で開発された新型炉の実現までの概略スケジュール等を過去の例を参考に検討しており、現在、実現までの各段階（設計・建設等）でどのようなタスクがあるか、国内外事例の確認等を行い、検討を進めている。今後、規制に関するタスクについては、浮体式原子力発電の規制が整備されていないため、原子力船「むつ」の実績等を参考に検討する予定である。

3.2. 浮体式原子力発電の建設コスト（概算）の把握

3.1 のスケジュールと同様に、おおよそのコストについても把握する必要がある。本検討では、浮体式原子力発電の原子力に係る設備は既設の陸上の原子力発電と同じとし、陸上と相違のある浮体構造物等のコストについて、検討する予定である。

3.3. 浮体式原子力発電（炉型：BWR）のレイアウト検討（概念設計レベル）

鳥瞰図等を用いて浮体式原子力発電がどのような構造なのかを示していくことは、浮体式原子力発電の検討、実現のために重要なことである。

図 1 に示すように、炉型を PWR とした場合のレイアウトは、MIT の Michael Golay 教授らが検討しているが、BWR のレイアウトについては検討されていないため、電気出力 60 万 kW の BWR を選択した場合のレイアウトについて、検討することとした。なお、本検討では、各機器の設計までは実施しないが、機能・制約条件（メンテナンス場所の確保、浮体構造物のサイズ等）を満たしたレイアウトとすることとし、検討を始めており、国内で製造可能な浮体構造物の最大サイズを確認すると共に、浮体式原子力発電の系統、機器・構造物の検討、レイアウトの検討を進めているところである。最終報告までに、図 1 のような鳥瞰図を示すことを目標に検討を進めていく。

3.4. 国際連携の枠組み作りに向けた活動

浮体式原子力発電の実現には、様々な関係者との協力が必要であり、国内関係者に留まらず、国外の関係者との協力も必要となる。そのため、国際連携の枠組みを作る活動を進めている状況である。例えば、国際原子力機関（IAEA）主催で 2021 年 5 月 18 日に開催されたウェビナー³“Advances in Reactor Technologies for Marine-based Small Modular Reactors”³では、洋上の原子力発電について検討・実現している中国、韓国、ロシア、米国の各機関の検討の状況が紹介

³ <https://www.iaea.org/nptd-webinars> より、ウェビナー資料のダウンロードが可能である。

され、その状況を把握するとともに、参加者全員で意見交換を行った。また、Michael Golay 教授等の浮体式原子力発電を提唱した関係者には、2020年度の浮体式原子力発電研究会の成果（報告書）を共有すると共に、意見交換を行っている。今後も、実現に向けて、国外の様々な関係者との協力体制の確立に向け、活動を進めていく。

4. 浮体式原子力発電の長所に関する検討の進捗状況

浮体式原子力発電の長所に関する検討として、表 1 の No.5～6 について検討している。各検討の進捗状況は以下の通り。

4.1. 海水を活用した静的な崩壊熱除去システムの成立性検討

陸上の原子力発電所よりも安全性を向上するために、電源を必要とせず、豊富な冷却材を使用して燃料棒内に含まれる核分裂生成物の崩壊で生じた崩壊熱を除去する機能が不可欠である。浮体式原子力発電では、海水を使用した静的な崩壊熱除去システムとして、既に米国原子力規制委員会 (U.S.NRC) で標準設計認証を取得している ESBWR が採用した主要な安全システムを参考にし、隔離時復水器 (以下 ICS)、重力落下式炉心冷却系 (以下 GDSC)、静的格納容器冷却系 (以下 PCCS) の 3 つの設備 (図 3 参照) に関する簡易設計の検討を実施する予定である。

さらに本検討で得られた結果を 3.3 節のレイアウト検討に反映し、考慮した静的な崩壊熱除去システム安全系が浮体構造物に搭載可能か確認する。

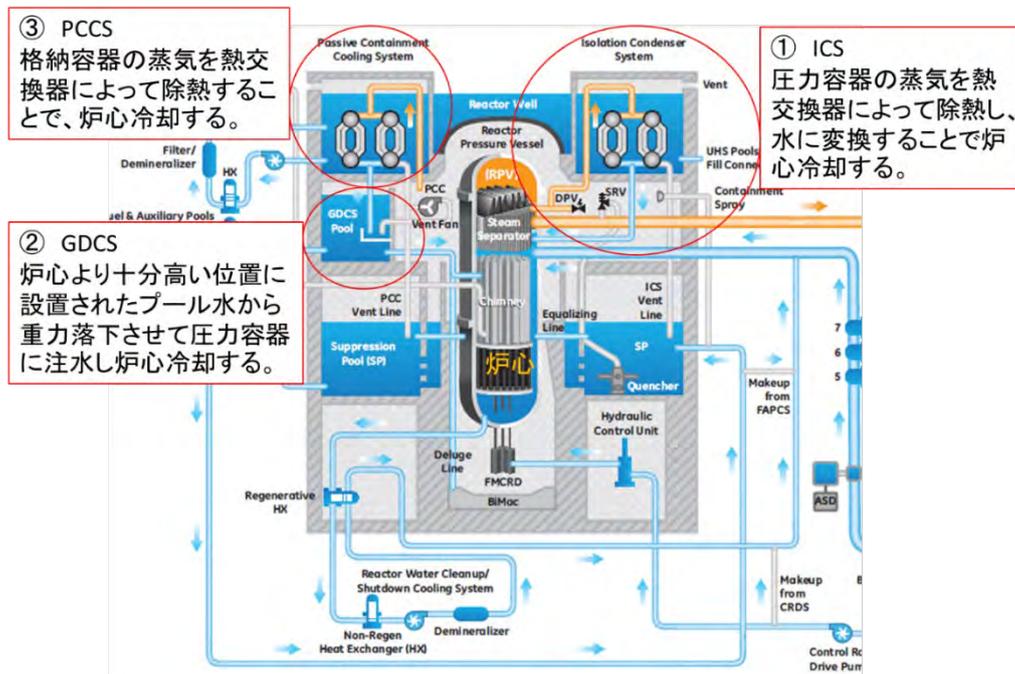


図 3 ESBWR が採用している安全システム⁴

4.2. 浮体式原子力発電の安全性・過酷事故評価の簡易検討

陸上の原子力発電所で考慮されている事故事象に対して、前節 4.1 にて紹介した ICS、GDSC、PCCS を利用した場合に、既存炉の対応手段と比較してどの様に安全性が高まるのか整理する。

また浮体式原発のレイアウトでは、区分分離の徹底を図ると同時に多様性、多重性の強化を検討予定である。これらの結果、事故への故障の影響がどのように軽減されるかを検討する予定である。

⁴ GE Hitachi Nuclear Energy “The ESBWR Plant General Description”より抜粋

5. 陸上の原子力発電との相違に関する検討の進捗状況

陸上の原子力発電との相違に関する検討として、表 1 の No.7～11 について検討している。各検討の進捗状況は以下の通り。

5.1. 浮体式原子力発電の保守実施場所

浮体式原子力発電の保守場所については、立地海域（洋上）と修繕ドック（陸上）の 2 つが考えられる。浮体式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備（FPSO）等の浮体式の洋上生産設備では、生産停止期間を短縮するため、洋上での保守が選択されている。洋上での保守を選択する場合、保守作業の一つであるクレーンによる重量物の吊り上げ作業について、揺動が大きい場合には作業に影響を及ぼす可能性がある。一方、陸上での保守を選択する場合、定検期間の長期化等のデメリットが考えられる。そのため、本検討では、浮体式原子力発電の設備として、どのような保守作業が発生するかを把握し、保守場所として、洋上と陸上を選択した場合のメリット・デメリットを整理することとし、検討を進めている。現在、どのような保守作業があるか、確認を進めている。

5.2. 長期間の運用を考慮した浮体構造物の設計・保守

陸上の原子力発電と比較し、浮体式原子力発電特有の設備として、浮体構造物が挙げられる。浮体式原子力発電を効率的かつ安全に運用できるよう、また、長期間の運用を考慮した浮体構造物の設計・保守について、FPSO 等を参考に、検討している。

■ 設計

タンカーでは、原子力発電所で考慮されているような長期間の供用は考慮されていないため、長期間の供用を考慮した設計が必要である。そのため、長期間の運用や洋上での保守を前提とした場合に課題になると考えられる部位について、検討を進めているところであり、例えば、設計段階における船体・船底の塗装の選定が挙げられる。タンカー等では入渠を前提に設計段階で塗料が選択されているが、洋上での保守を選択する場合には、長期間使用できる塗装が必要になり、洋上での保守を前提に設計されている FPSO 等の浮体式の洋上生産設備に使用されている塗装を活用することが考えられる。今後、他部位についても、検討を進めていく。

■ 保守

タンカーは 5 年間に 2 回の検査（中間検査・定期検査）を受ける必要があり、2.5 年毎に修繕ドックに入渠しているが、FPSO 等の浮体式の洋上生産設備の場合は、生産停止期間を短縮するため、入渠せずに洋上で保守することについて船級協会から承諾を取得することが多い⁵。浮体式原子力発電についても、同様の保守方法を取ることが考えられ、保守が必要になると考えられる部位を確認するとともに、その保守方法（または、長期間、保守不要とできる方法の検討）につい

⁵ 国土交通省「海洋開発ビジネス概論（改訂第 1 版）」

て、他産業の例を調査し、検討する方針である。検討例として、図 4 に示す海洋石油開発の分野で開発された浮体構造物に付着したカキなどを除去する ROV (ジャケットを構成する鋼管を挟み、移動しながら作業) の活用 (応用) が挙げられる。

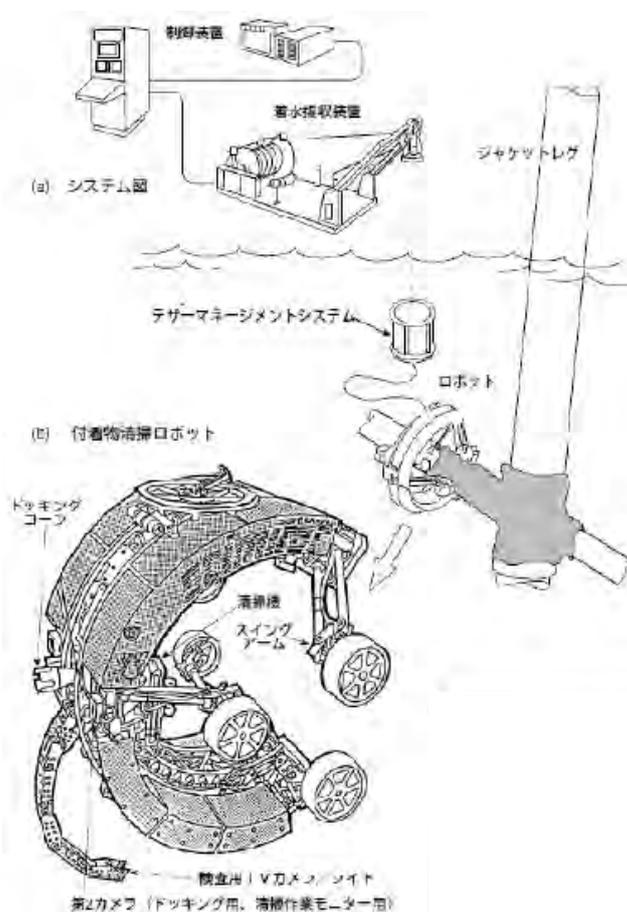


図 4 付着物清掃作業用 ROV⁶

5.3. 浮体式原子力発電に適した位置保持技術

浮体式原子力発電では、一定の場所に位置保持することが求められるため、浮体式風力発電で使用されているような位置保持技術が必要である。一般的に、位置保持技術として、係留方式と自動船位保持装置 (DPS) 方式があり、各方式ともに様々な種類がある。本検討では、浮体式原子力発電に適した位置保持技術の検討を進めていく。

5.4. 浮体揺動における BWR 成立性の評価

本節の内容は 2020 年度に引き続き検討されている課題である。洋上における軽水炉の実績は世界でも未だに PWR のみである。しかし、今後のグリーン成長戦略やエネルギーセキュリティの観点から原子力の必要性が高まることを想定して、もう一つの軽水炉である BWR についても

⁶ (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構「海洋工学ハンドブック (第 7 版)」

選択肢の一つとして検討していく必要がある。

BWR は炉内にある冷却材（水）を燃料棒内に含まれるウランの核分裂による熱で直接沸騰させることでタービンを駆動するための蒸気を発生させる。洋上の場合、揺動によって炉心内の蒸気量が増減し、それに伴う核分裂反応の変化により BWR の炉心出力が増減する可能性があり、定格運転時に炉心出力上昇により頻りに緊急停止を起こすことが懸念された。また一般に水を沸騰する過程で熱負荷が過度になると燃料棒が蒸気で覆われることにより冷却材の冷却性能が急激に下がる遷移現象が知られており、その遷移点における熱流束を限界熱流束（CHF）と呼ぶが、船用炉に関する既往研究では、揺動の影響によって炉心流量が変動し CHF が低下することが報告されていた。2020 年度の検討では、浮体構造物の形状が非常に揺れにくく、波浪等により浮体構造物の受ける加速度が陸上プラントの地震動などと比較して大きなものではないため、定性的には揺動の影響は小さいと結論付けた。今後は陸上と同等以上の安全性・安定性があるか定量的に確認するために、揺動の影響について実機を想定した高温高压条件下の熱流動実験を実施する必要がある。そのため 2021 年度は、この高温高压条件下実験を実施するための実験計画の策定を検討する。さらに米国原子力規制委員会（U.S.NRC）が開発している解析コードを用いて既存炉に揺動を加えた数値計算を実施し、揺動による影響がプラントの安全性・安定性の観点から顕著に表れる物理量は何か明らかにする。

実験計画は BWR の揺動に関係する文献について再調査を実施し、BWR の揺動、特に縦揺れ、の影響について不足している知見や、揺動の影響に重要となる実験条件の洗い出しを検討中である。また解析コードを用いた数値計算では、元の解析コードに揺動の効果を加える様に改良を終え、地震動を入力値にしたテスト計算による検証を終えている。

5.5. ロンドン条約・議定書への対応

放射性廃棄物の海洋投棄は、1975 年に発効された「廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約（ロンドン条約）」により禁止されている。ロンドン条約発効後、海洋汚染の防止措置を更に強化するため、「1972 年の廃棄物その他の物の廃棄による海洋汚染の防止に関する条約の 1996 年の議定書（ロンドン議定書）」が 2006 年に発効されている。同議定書では、廃棄物等の海洋投棄及び洋上焼却を原則禁止した上で、例外的にしゅんせつ物、下水汚泥など、海洋投棄を検討できる品目（放射性廃棄物は含まれない）を列挙するとともに、これらの品目を海洋投棄できる場合であっても、厳格な条件の下でのみ許可することとされている。本議定書の国内担保法である「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律」、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」および、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（原子炉等規制法）」の内、放射性廃棄物については、原子炉等規制法により規制されている。このように、放射性廃棄物の海洋投棄について規制される中で、浮体式原子力発電の通常の運用に伴って発生する放射性廃棄物の扱いについて、陸上と同様の運用が可能か、調査した。具体的には、ロンドン条約・議定書、原子炉等規制法を確認しており、その結果、以下に記載の通り、液体と気体の放射性廃棄物については、陸上の原子力発電と同様に可能な限り低濃度にした上で放出することがロンドン条約・議定書、原子炉等規制法で規制されている海洋投棄には当たらないことがわかった（＝陸

上と同様の運用が可能)。

■ ロンドン条約・議定書

ロンドン議定書第四条（廃棄物その他の投棄）では、放射性廃棄物の廃棄を禁止することが明記されている。一方、投棄の定義（第一条）より、通常の運用に伴って発生する放射性廃棄物の放出は海洋投棄に当たらないと考えられる（＝陸上と同様の運用が可能）。

第四条 廃棄物その他の物の投棄

締約国は、廃棄物その他の物（附属書一に規定するものを除く。）の投棄を禁止する。
→附属書一に放射性廃棄物は含まれない

第一条 定義

「投棄」には、次のことを含まない。
船舶、航空機又はプラットフォームその他の人工海洋構築物及びこれらのものの設備の通常の運用に付随し、又はこれに伴って生ずる廃棄物その他の物を海洋へ処分すること。ただし、廃棄物その他の物であって、その処分に従事する船舶、航空機又はプラットフォームその他の人工海洋構築物によって又はこれらに向けて運搬されるもの及び当該船舶、航空機又はプラットフォームその他の人工海洋構築物における当該廃棄物その他の物の処理に伴って生ずるものを処分することを除く。

■ 原子炉等規制法

国内担保法である原子炉等規制法では、第六十二条（海洋投棄の制限）で放射性廃棄物の投棄について規定されている。ロンドン議定書と同様に、放射性廃棄物の海洋投棄が禁止されているが、次の2点は対象外とされている。

- ① 人工海洋構築物から海洋に人工海洋構築物及びこれらの設備の運用に伴って生ずる物を廃棄すること
- ② 人工海洋構築物において廃棄する目的で人工海洋構築物及びこれらの設備の運用に伴って生ずる物を燃焼させること

浮体式原子力発電において、通常の運用に伴って発生する放射性廃棄物の放出は海洋投棄に当たらないと考えられる（＝陸上と同様の運用が可能）。

第六十二条 海洋投棄の制限

- 1 核原料物質若しくは核燃料物質又はこれらによつて汚染された物は、海洋投棄をしてはならない。ただし、人命又は船舶、航空機若しくは人工海洋構築物の安全を確保するためやむを得ない場合は、この限りでない。
- 2 前項において「海洋投棄」とは、船舶、航空機若しくは人工海洋構築物から海洋に物を廃棄すること又は船舶若しくは人工海洋構築物において廃棄する目的で物を

燃焼させることをいう。ただし、船舶、航空機若しくは人工海洋構築物から海洋に当該船舶、航空機若しくは人工海洋構築物及びこれらの設備の運用に伴って生ずる物を廃棄すること又は船舶若しくは人工海洋構築物において廃棄する目的で当該船舶若しくは人工海洋構築物及びこれらの設備の運用に伴って生ずる物を燃焼させることを除く。

また、原子力船「むつ」やロシアの KLT-40S のように、運転中に発生する液体と固体の放射性廃棄物を浮体構造物内に貯蔵することについて、貯蔵スペース確保の観点から可否を検討した。具体的には、既設炉の公開データ（液体：1 運転サイクル中の海洋放出量、固体：1 年間のドラム缶発生本数）を参考に簡易的な評価を行った結果、液体と固体共に十分に貯蔵スペースを確保できることがわかった。最終報告書では、これらデータを纏めた上で具体的データを示し、報告する。

6. 既設炉からの更なる安全性向上に関する検討の進捗状況

既設炉からの更なる安全性向上に関する検討として、表 1 の No.12～14 について検討している。各検討の進捗状況は以下の通り。

6.1. 原子炉減圧機能の多様化

炉心損傷に至る恐れのある事故下において、原子炉の減圧機能は安全上重要な役割を担う。原子炉圧力を減圧し低圧の状態を保つことで原子炉への低圧注水が可能となり、原子炉を速やかに冷却し炉心損傷を未然に防止する。例えば、福島第一原子力発電所（1F）の事故では消防車を用いた原子炉注水を実施しているが、消防車のように吐出圧力の低い注水手段によって原子炉へ注水するためには原子炉の減圧が必要不可欠となる。

BWR プラントの減圧手段には主蒸気逃がし安全弁（SRV）が用いられており、SRV を開けることで原子炉内の水蒸気を圧力抑制室へ逃がし、減圧を行う仕組みである。しかし、1F 事故では SRV の操作に必要な電源・駆動用窒素が不足したこと等によって原子炉の減圧に時間がかかり、速やかに低圧注水を行うことができなかった。

これを教訓として、より安全かつ確実な原子炉減圧方法を検討するワーキンググループを立ち上げた。今後、最終報告書に向けて新たな減圧方法の概念検討・分析・評価を進めていく。

6.2. 過酷事故時の原子炉水位計測の多様化

過酷事故下において、原子炉水位の値は原子炉の状況・事故の進展を知る上で重要な意味を持つ。BWR プラントでは凝縮槽方式の水位計を採用しているが、これは常に一定の水位が形成された基準面器と圧力容器下部との圧力差を原子炉水位に換算するものである。したがって、正確な水位を計測するには、基準面器の水位を一定に保つ必要がある。

しかし、1F 事故では基準面器の水位が低下し、原子炉水位が監視できない状態が発生した。これは原子炉圧力容器の気相漏えいによってドライウェル（格納容器内）に蒸気が流入し、ドライウェル気相温度が上昇したことにより基準面器内の水が蒸発したこと、また、漏えいにより原子炉圧力容器が減圧され、水の飽和温度が低下し、基準面器内の水が蒸発しやすい状況となったことが要因と推定されている。

これを教訓として、過酷事故下における確実な水位計測方法を検討するワーキンググループを立ち上げた。今後、最終報告書に向けて概念検討・分析・評価を行う予定である。また、原子炉の状況・事故の進展を把握する手段は水位計測に限らないため、本ワーキンググループでは水位計測以外の手段も視野に入れ幅広く検討を行うことを考えている。

6.3. 効率的な燃料交換システム・使用済み燃料プールのスロッシング対策

既設炉における燃料交換システムおよび使用済み燃料プールに関する課題を克服し、浮体式原子力の効率的かつ安全な運用の実現を目的として検討を実施するものである。

まず、既存の燃料交換機は数十年前と比較して技術的進歩が少なく、定期検査時、燃料交換作業に多くの時間を割いている。これを、燃料集合体の確実な保持をしつつ移動速度を上げるような

システムに変更することで燃料交換の効率的な実施を目指す。

次に、新潟県中越沖地震において使用済燃料プールのスロッシング（プールの液面が激しく揺れる現象）発生によりプール水がオペレーティングフロアに溢れ出した事象を教訓として、スロッシング発生を防止する設計を検討し使用済燃料プールからの冷却水の漏洩防止を図るものである。

7. 浮体式原子力発電関連の知見収集に関する検討の進捗状況

洋上の原子力発電に関する検討は過去に我が国においても様々な検討が行われており、古くは日本原子力船研究協会では実施されており、技術資料が出版されている。また、浮体式原子力発電についても、MITのMichael Golay教授らの論文が公開されており、多くの検討が行われている。そのため、これらの貴重な知見を浮体式原子力発電の検討に活用するため、参加者全員で文献調査を行っている。最終報告書に向けて、可能な限りこれら資料を確認していく予定である。

8. 産業競争力強化のための提言および施策

最終報告書に向け、提言および施策についても検討している段階ではあるが、現時点の提言として、以下の4点について産官学が一体となって取り組むことが挙げられる。

- ・ 産業界は、浮体式原子力発電の設計の具体化、安全性高度化を推進する組織を構築する。
- ・ 学会は、浮体式原子力発電技術から派生する研究開発を活性化し人材育成につなげる。
- ・ 国は、国際的な協力体制の構築を図る。
- ・ 規制当局は、浮体式原子力発電による、安全性向上のための意見交換の場を作ること。

9. 最終報告書に向けた検討上の課題と展開

本プロジェクトでは、5つの観点（浮体式原子力発電の実現、浮体式原子力発電の長所、陸上の原子力発電との相違、既設炉からの更なる安全性向上、浮体式原子力発電関連の知見収集）から15の検討事項を設定し、検討を進めている。最終報告書に向け、各検討事項の検討を進めていく。

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 4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