

【産業競争力懇談会 2022年度 プロジェクト 中間報告】

## 【浮体式原子力発電】

2022年10月20日

産業競争力懇談会 **COCN**

## 【エクゼクティブサマリー（中間）】

### 1. 本プロジェクトの基本的な考え方

脱炭素社会の実現のためには、エネルギー戦略が重要になってくる。2022年8月24日に開催された内閣総理大臣を議長とする第2回GX（グリーントランスフォーメーション）実行会議においては、再生可能エネルギーに加えて原子力もGXを進める上で不可欠な脱炭素エネルギーとし、既設原子力発電所の最大限の活用に加えて、新たなメカニズムを組み込んだ次世代革新炉の開発・建設についても検討を進めていくこととなった。

一方で、今後原子力発電を活用するためには、我が国で発生した福島第一原発事故の発生原因を踏まえた大幅な安全性向上を図る必要がある。すなわち、津波への耐性向上、長期間安定した崩壊熱の除去、事故発生時の避難の負担軽減が求められる。これら要求に合致する原子力発電の一つとして、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）がある。

浮体式原子力発電は、海洋掘削リグとして建造実績のある円筒型浮体構造物と原子力発電設備を組合わせた発電所であり、沖合30km付近の洋上に浮かせる。なお、沖合30km付近とする理由は、居住区域が「緊急防護措置を準備する区域（UPZ）」（広域避難計画を策定する地域）より外に位置するようにしたいとの考えから設定している。下図に示すように、原子炉は海面より下に設定されており、その上にタービン等が設置されている。原子炉の炉型には、既存の沸騰水型原子炉（BWR）や加圧水型炉原子炉（PWR）に加えて、将来的にはSMR（Small Modular Reactor）も考えられる。浮体式原子力発電の特徴として、次の4点が挙げられ、この優れた安全性等に着眼し、2020年度に「浮体式原子力発電研究会」を、2021年度からはプロジェクト化し、検討を進めている。これまでの海洋の原子力設備（原子力船等）では炉型として加圧水型原子炉（PWR）が選択されているが、格納容器が小型である等の利点を有する沸騰水型原子炉（BWR）にも着眼し、両炉型を候補に検討を進めており、BWR特有の検討事項も設定している。

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>① 水深が深い洋上に位置するため、津波の影響を小さくすることができる。また、陸上と比較して地震（海震）による影響を小さくすることができる。</li><li>② 周囲にある大量の海水を動力なしに原子炉からの崩壊熱冷却に利用できる。</li><li>③ 陸地から離れた沖合に位置するため、事故時の住民負担を軽減することができる。</li><li>④ 集中した製造拠点で製造することで、建造効率が向上する。</li></ul> |
|--|

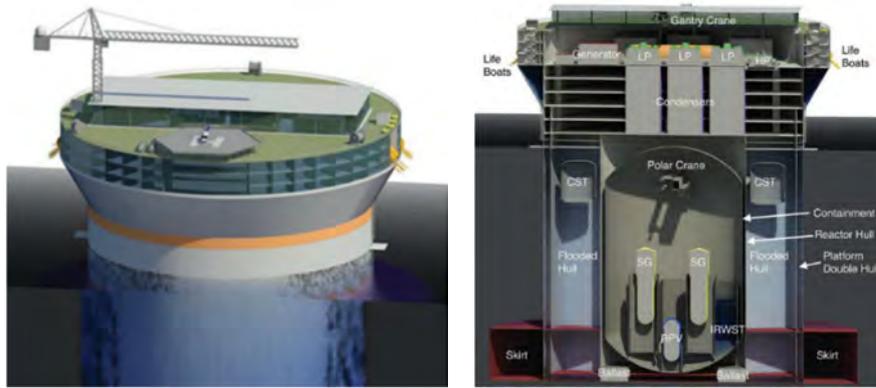


図 マサチューセッツ工科大学の Golay 教授らが提案する浮体式原子力発電 (OFNP) <sup>1</sup>

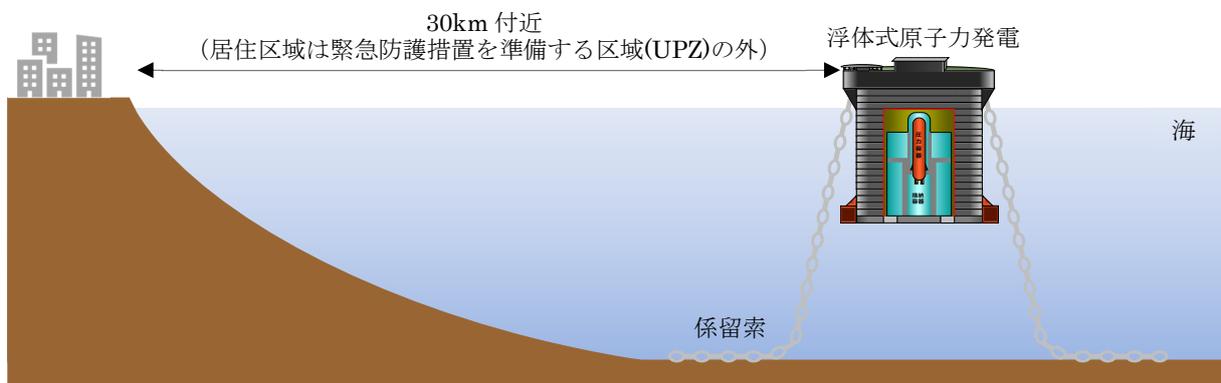


図 浮体式原子力発電の設置イメージ

## 2. 検討の視点と範囲

前述の通り、本検討は 2020 年度から進めており、2021 年度には安全性を向上させる設備に関する検討の他に、建造費を概略評価し、陸上の原子力発電所と比較して同等以下であると評価している。2022 年度の検討の視点として、浮体式原子力発電の実現に向けた検討を進めることを設定しており、技術的側面に加え、実現に向けて重要となる社会的側面、制度・運用面の観点からも検討している。加えて、実現には国際連携が不可欠なことから、国際連携に向けた活動を実施している。また、今後の検討に活用可能な過去の知見収集を実施している。これら検討の一部については、経済産業省補助事業である NEXIP イニシアチブ「社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」とも連携をして進めている。

技術的側面の検討では、実現に向けた検討段階において実施する運用海域の選定に必要な項目の抽出、原子力発電において重要な安全設備に関する検討、揺動による原子炉等への影響、レイアウト、建造・保守場所や建造技術、核セキュリティ対策について検討している。

社会的側面の検討では、実現に向けて重要となる浮体式原子力発電の社会的受容性に関する検討と浮体式原子力発電の実現に必要な情報発信を実施している。

<sup>1</sup> J. Buongiorno et al., “The Offshore Floating Nuclear Plant (OFNP) Concept,” Nucl.Tech., vol.194, pp.1-14 2016.

制度・運用面の検討では、実現に必要な法令の改正に関連し、浮体式原子力発電に必要な法整備の内容を検討すると共に、洋上に設置される浮体式原子力発電の運用方法を検討している。

国際連携に向けた活動や知見収集に関連し、国際連携の枠組み作りに向けて海外の原子力関係者を中心に対話活動を実施している。また、原子力船むつ等の知見収集等を実施している。

### 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、提言および施策実現について検討している段階であるが、現時点では、浮体式原子力発電を活用した産業競争力強化のために、COCNとして原子力小委員会やGX実行会議に本プロジェクトの成果を説明し、その有効性を訴えていくことが必要である。

また、浮体式原子力発電の実現のためには、今後十年前後の期間を要すると予想される。その間に原子力発電の設計、建設の経験を有する人材が減少していくことが不可避である。浮体式原子力発電の具体的な設計が行われる今後数年の期間は、経験豊富な世代から次世代を担う若手技術者に対し知見を引き継ぐための重要な期間となる。産学官は協力して、次世代を担う若手・学生に対して、イノベーティブな浮体式原子力発電の設計プロセスの魅力をアピールし、原子力発電を担う人材獲得・育成を全員で協力しながら達成していくことを提案する。

### 4. 最終報告書に向けた検討上の展開

本プロジェクトでは、前述の通り、様々な観点から14の検討事項を設定し、個々の検討事項について最終報告書に向けて検討を進めている。これらの検討事項の検討は個々のワーキンググループで検討を進めており、これを継続して進めていく。

## 【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 .....              | 6  |
| 1.1. 本プロジェクトの背景 .....               | 6  |
| 1.2. 本プロジェクトの目的 .....               | 8  |
| 2. 本プロジェクトの進め方 .....                | 9  |
| 3. 技術的側面からの検討 .....                 | 11 |
| 3.1. 運用海域の選定 .....                  | 11 |
| 3.2. 浮体式原子力発電の安全設備 .....            | 11 |
| 3.3. 揺動関係 .....                     | 13 |
| 3.4. 浮体式原子力発電（炉型：BWR）のレイアウト検討 ..... | 15 |
| 3.5. 建造場所・技術、保守場所 .....             | 16 |
| 3.6. 長期運用を考慮した浮体構造物の設計・保守 .....     | 16 |
| 3.7. 核セキュリティ .....                  | 17 |
| 4. 社会的側面からの検討 .....                 | 18 |
| 4.1. 社会的受容性 .....                   | 18 |
| 4.2. 本プロジェクトの情報発信 .....             | 18 |
| 5. 制度・運用面からの検討 .....                | 20 |
| 5.1. 必要な法整備の検討 .....                | 20 |
| 5.2. 発電所の運用方法 .....                 | 21 |
| 6. 国際連携に向けた活動・知見収集 .....            | 22 |
| 6.1. 国際連携の枠組み作りに向けた活動 .....         | 22 |
| 6.2. 浮体式原子力発電関連の知見収集 .....          | 22 |
| 6.3. むつの経験共有・現地調査 .....             | 22 |
| 7. 産業競争力強化のための提言および施策 .....         | 23 |

## 【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 | 松原 儀尚           | (東芝エネルギーシステムズ株式会社)    |
|      | 中西 大介           | (東芝エネルギーシステムズ株式会社)    |
|      | 高橋 宗孝           | (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)    |
|      | 後藤 圭太           | (東芝エネルギーシステムズ株式会社)    |
|      | 佐藤 隆司           | (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)    |
|      | 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) |
|      | 清水 雄亮           | (日立GEニュークリア・エナジー株式会社) |
|      | 久保 直紀           | (日立GEニュークリア・エナジー株式会社) |
|      | 寺村 芳明           | (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)           |
|      | 塚本 泰史           | (三菱造船株式会社)            |
|      | 久々津 諒平          | (三菱造船株式会社)            |
|      | 小池 大介           | (株式会社 IHI)            |
|      | 鈴木 清照           | (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)         |
|      | 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)         |
|      | 目黒 伸充           | (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)         |
|      | 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) |
| 福田 航大 | (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)            |
| 藤岡 諒  | (原燃輸送株式会社)            |
| 山口 洵  | (原燃輸送株式会社)            |
| 山崎 正俊 | (株式会社スタズビック・ジャパン)     |
| 南 清和  | (東京海洋大学)              |
| 賞雅 寛而 | (東京海洋大学)              |
| 井原 智則 | (東京海洋大学)              |
| 師岡 慎一 | (早稲田大学 名誉教授)          |
| 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)              |
| 高橋 秀治 | (東京工業大学)              |
| 原 大輔  | (東京工業大学)              |
| 櫻原 達也 | (イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校)  |
| 岡本 孝司 | (東京大学)                |
| 村上 健太 | (東京大学)                |
| 山形 浩史 | (長岡技術科学大学)            |
| 齊藤 泰司 | (京都大学)                |
| 伊藤 啓  | (京都大学)                |
| 伊藤 大介 | (京都大学)                |
| 大平 直也 | (京都大学)                |
| 遠藤 知弘 | (名古屋大学)               |
| 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)       |
| 池谷 知彦 | (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)       |
| 鶴留 千晶 | (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)           |
| 遠藤 博史  | (関西電力株式会社)           |
| 長谷川 寛  | (関西電力株式会社)           |
| 梅田 敏郎  | (中部電力株式会社)           |
| 原 哲也   | (中部電力株式会社)           |
| 上岡 幹優  | (中部電力株式会社)           |
| 及川 智之  | (元フランス電力日本駐在事務所)     |
| 伊藤 大輔  | (一般財団法人発電設備技術検査協会)   |
| 古塚 伸一  | (一般社団法人日本原子力産業協会)    |
| 土平 広樹  | (一般社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) |
| 木野 千晶  | (一般財団法人エネルギー総合工学研究所) |
| 佐脇 俊之  | (日本電気株式会社)           |
| 林 真照   | (三菱電機株式会社)           |
| 山下 裕宣  | (一般社団法人日本保全学会)       |
| 金子 誠司  | (株式会社テプコシステムズ)       |
| 末廣 祥一  | (株式会社テプコシステムズ)       |
| 佐藤 親宏  | (株式会社テプコシステムズ)       |
| 五十嵐 信二 | (株式会社東京エネシス)         |
| 平尾 克己  | (東京パワーテクノロジー株式会社)    |
| 設楽 親   | (KK6 安全対策共同事業株式会社)   |
| 姉川 尚史  | (東京電力ホールディングス株式会社)   |
| 石井 武生  | (東京電力ホールディングス株式会社)   |
| 後藤 章   | (東京電力ホールディングス株式会社)   |
| 上村 孝史  | (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)   |
| 大森 修一  | (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)   |
| 小暮 将之  | (東京電力ホールディングス株式会社)   |
| 徳大路 悠太 | (東京電力ホールディングス株式会社)   |
| 神戸 勇汰  | (東京電力ホールディングス株式会社)   |
| 川端 洋佑  | (東京電力ホールディングス株式会社)   |
| 大嶋 輝   | (東京電力ホールディングス株式会社)   |
| 光山 童夢  | (東京電力ホールディングス株式会社)   |
| 金澤 脩平  | (東京電力ホールディングス株式会社)   |
| 藤原 卓真  | (東京電力ホールディングス株式会社)   |
| 田口 涼太  | (東京電力ホールディングス株式会社)   |

|       |                    |
|-------|--------------------|
| 猪俣 朋樹 | (東京電力ホールディングス株式会社) |
| 鈴木 智広 | (東京電力ホールディングス株式会社) |
| 三宅 響  | (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) |
| 中野 宏之 | (東京電力ホールディングス株式会社) |

COCN

|         |                |
|---------|----------------|
| 森山 善範   | (COCN 担当実行委員)  |
| 山口 雅彦   | (COCN 理事・事務局長) |
| 五日市 敦   | (COCN 副事務局長)   |
| 武田 安司   | (COCN 副事務局長)   |
| 土肥 英幸   | (COCN 副事務局長)   |
| 岩田 一    | (COCN 企画小委員)   |
| 大久保 進之介 | (COCN 企画小委員)   |
| 金枝上 敦史  | (COCN 企画小委員)   |
| 菊地 達朗   | (COCN 企画小委員)   |
| 佐藤 桂樹   | (COCN 企画小委員)   |
| 中山 慶祐   | (COCN 企画小委員)   |

## 【本 文】

### 1. 本プロジェクトの背景・目的

#### 1.1. 本プロジェクトの背景

脱炭素社会の実現には、原子力発電が必要であるが、東京電力福島第一原子力発電所事故（1F事故）による周辺地域の避難人数（図 1）からもわかるように 1F 事故のような事故が発生した場合には周辺住民大きな影響を及ぼす。そのため、今後の原子力発電には、安全性が高いことに加え、事故時の影響を緩和できることが求められる。これら要求に合致する原子力発電の一つとして、本プロジェクトで検討する浮体式原子力発電が挙げられ、2020 年度から産業競争力懇談会（COCN）において検討を進めている。これまでの海洋の原子力設備（原子力船等）では炉型として加圧水型原子炉（PWR）が選択されているが、格納容器が小型である等の利点を有する沸騰水型原子炉（BWR）にも着目し、両炉型を候補に検討を進めており、BWR 特有の検討事項も設定している。

本プロジェクトで検討している浮体式原子力発電は、原子力船むつ、ロシアのアカデミック・ロモノソフのような船型とは異なり、石油掘削リグで建造実績のある円筒形状（モノコラム型）の浮体構造物に原子力発電設備を設置するものであり、マサチューセッツ工科大学（MIT）の Michael Golay 教授らが提案している<sup>2</sup>。モノコラム型を採用する理由として、喫水が深いため揺動が小さくなること等が挙げられる。

浮体式原子力発電の構造は、図 2 に示すように海面より下に原子炉が、その上にタービンが配置される構造である。炉型は、加圧水型原子炉や沸騰水型原子炉等が考えられる。浮体構造物の特徴としては、上記に記載の喫水が深いことに加え、下部にスカートを設けることで重心が下がることから、浮体構造物を安定させる（揺動を低減する）仕組みになっていることが挙げられる。また、浮体構造物のため、位置保持技術が必要となるが、係留索や自動船位保持装置（Dynamic Positioning System）の使用が考えられ、送受電のために海底送電線の敷設が必要となる。浮体式原子力発電の設置箇所は、「緊急防護措置を準備する区域（UPZ）」<sup>3</sup>の外に居住区域が位置するよう、沖合 30km 付近の洋上とすることを考えている。

浮体式原子力発電の特徴として、次に示す 4 点の特徴が挙げられる。

- ・ 水深が深い洋上に位置するため、津波の影響を小さくすることができる。また、陸上と比較して地震（海震）による影響を小さくすることができる（詳細確認中）。
- ・ 周囲にある大量の海水を動力なしに原子炉からの崩壊熱除去に利用できる。
- ・ 陸地から離れた沖合に位置するため、事故時の住民負担を軽減することができる。
- ・ 集中した製造拠点で製造することで、建造効率が向上する。

<sup>2</sup> J. Buongiorno et al., “The Offshore Floating Nuclear Plant (OFNP) Concept”, Nucl. Tech., vol.194, pp.1-14, 2016.

<sup>3</sup> 国の防災基本計画第 12 編原子力災害対策編では、実用発電用原子炉施設からおおむね半径 30km 圏内の原子力災害対策指針に基づく「緊急防護措置を準備する区域（UPZ）」内の地方公共団体において広域避難計画を策定することとしている。



図 1 東日本大震災・東京電力福島第一原子力発電所事故による避難人数（2011/3/25 8 時時点）<sup>4</sup>

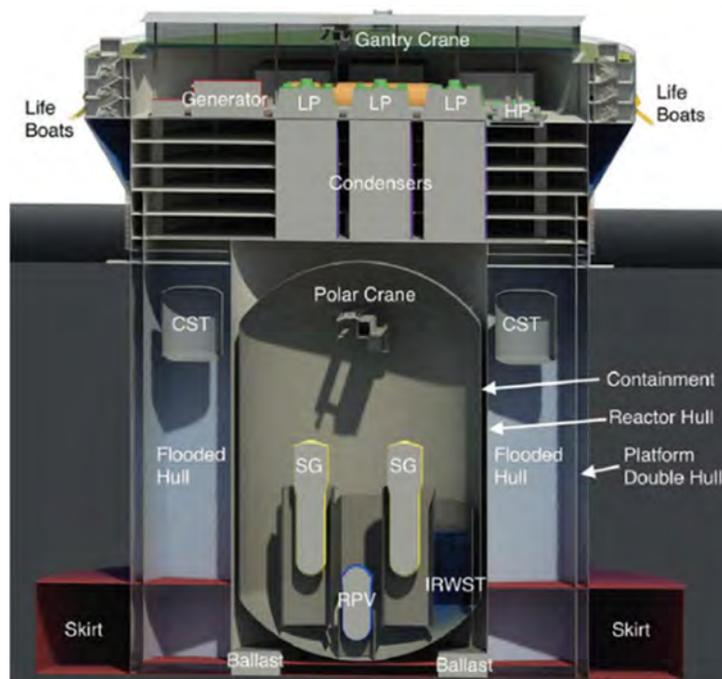


図 2 MIT の Golay 教授らが提案する浮体式原子力発電の構造図<sup>5</sup>

<sup>4</sup> 福島県災害対策本部「平成 23 年度東北地方太平洋沖地震による被害状況即報（第 64 報）」より作成

<sup>5</sup> J. Buongiorno et al., “The Offshore Floating Nuclear Plant (OFNP) Concept,” Nucl.Tech., vol.194, pp.1-14 2016.



図 3 浮体式原子力発電のイメージ図

## 1.2. 本プロジェクトの目的

我が国への導入実現を目指し、浮体式原子力発電の長所および課題を抽出検討するとともに、より安全な原子力発電の実現に向けた施策を検討することを目的とする。

## 2. 本プロジェクトの進め方

本プロジェクトでは、浮体式原子力発電に関する検討事項を設定し、検討を進めている。2021年度には安全性を向上させる設備に関する検討の他に、建造費を概略評価し、陸上の原子力発電所と比較して同等以下であると評価している。2022年度の検討事項として、表1に示す14件を設定している（7件は2022年度に新たに設定した検討事項）。これら検討の一部については、経済産業省補助事業であるNEXIPイニシアチブ「社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」とも連携をして進めている。

技術的側面からの検討として、以下に示す7件の検討事項を設けている。第3章にこれらの検討状況を纏めている。

1. 立地計画の段階において、浮体式原子力発電の設置海域を選定する必要がある。そのため、今後の設置海域選定において考慮が必要となる項目（例：波高）を明らかにし、日本近海のデータ有無を確認する。また、選定において重要な項目になると考えられる外部事象について、その評価方法を整理する。（表1のNo.1）
2. 浮体式原子力発電の安全性に関する特徴として、周囲に大量に存在する海水を活用した原子炉の冷却機能の強化が挙げられる。本検討では、重力等の自然力による（無電源）安全性を高めた冷却機能の充実に加え、海水を活用した冷却機能を持つ設備を検討する。（表1のNo.2）
3. 2020年度からCOCNで検討している揺動による原子炉への影響（揺動が核燃料の除熱能力に与える影響）等の揺動関係の内容を検討する。（表1のNo.3）
4. 浮体式原子力発電（炉型：BWR）のレイアウトを検討する。（表1のNo.4）
5. 浮体式原子力発電の建造場所として造船所が考えられる。本検討では、造船場所に求められる条件や造船方法について検討する。加えて、浮体式原子力発電の保守は基本的に洋上での実施が考えているが、場合によっては造船所や浮きドックでの実施も必要になると考えられる。本検討ではこれら場所の必要条件（例：近海の水深等）についても検討する。（表1のNo.5）
6. 浮体式石油・ガス生産貯蔵積出設備（FPSO）等の設計寿命である約30年と比較すると、原子力発電の運用期間は長いため、浮体構造物の設計や保守の観点から長期運用への対応を検討する。（表1のNo.6）
7. 陸上の原子力発電と同様に浮体式原子力発電にも核セキュリティ対策が求められる。そのため、浮体式原子力発電の核セキュリティ対策について検討する。（表1のNo.7）

社会的側面からの検討として、以下に示す2件の検討事項を設けている。第4章にこれらの検討状況を纏めている。

8. 原子力発電に限らずどの事業でも社会から受容されることが必要不可欠なため、浮体式原子力発電では住民避難を容易にすること、地震時、津波時の安全性を高めることをしているが、そのような活動の受容性への影響を検討する。（表1のNo.8）

9. 浮体式原子力発電の実現には情報発信等による一般の方の感心を高めることが必要である。また、情報発信による、様々な視点からのご意見を頂けるため、様々な場で情報発信する。  
(表 1 の No.9)

制度・運用面からの検討として、以下に示す 2 件の検討事項を設けている。第 5 章にこれらの検討状況を纏めている。

10. 実現には現状の法令の改正が必要なため、浮体式原子力発電に必要な法整備を検討する。  
(表 1 の No.10)
11. 発電所が洋上に位置する場合の発電所の運用方法を検討する。(表 1 の No.11)

国際連携に向けた活動や知見収集に関連し、以下に示す 3 件の検討事項を設けている。第 6 章にこれらの検討状況を纏めている。

12. 国際連携の枠組み作りに向け、海外の原子力発電関係者との対話活動を実施する。(表 1 の No.12)
13. 国内外で検討されている原子力船等の洋上に設置される原子力設備に関する情報を収集し、浮体式原子力発電の検討に活用する。(表 1 の No.13)
14. 原子力船むつの経験を共有すると共に、むつ科学技術館に展示されているむつの設備を見学することで浮体式原子力発電の検討に活用する。(表 1 の No.14)

表 1 検討事項一覧

| No. | 報告書記載箇所 | 検討事項 (太字: 2022 年度新規件名)      |
|-----|---------|-----------------------------|
| 1   | 第 3 章   | <b>運用海域の選定</b>              |
| 2   |         | 浮体式原子力発電の安全設備               |
| 3   |         | 揺動関係                        |
| 4   |         | 浮体式原子力発電 (炉型: BWR) のレイアウト検討 |
| 5   |         | <b>建造場所・技術、保守場所</b>         |
| 6   |         | 長期運用を考慮した浮体構造物の設計・保守        |
| 7   |         | 核セキュリティ                     |
| 8   | 第 4 章   | <b>社会的受容性</b>               |
| 9   |         | <b>本プロジェクトの情報発信</b>         |
| 10  | 第 5 章   | <b>必要な法整備の検討</b>            |
| 11  |         | <b>発電所の運用方法</b>             |
| 12  | 第 6 章   | 国際連携の枠組み作りに向けた活動            |
| 13  |         | 浮体式原子力発電関連の知見収集             |
| 14  |         | <b>むつの経験共有・現地調査</b>         |

### 3. 技術的側面からの検討

#### 3.1. 運用海域の選定

浮体式原子力発電に適した運用海域の選定にあたり、考慮が必要な項目とそのデータ有無の整理を行う。また、プラントの安全性へ影響を及ぼし得る外部事象（自然現象、および、船舶の衝突等の人為的な事象）に対して、その評価方法と課題を整理する。

考慮すべき項目の検討では、陸上原子力発電所、海洋構造物等を参考に自然・人為ハザードを網羅的に抽出し、プラントへの影響、事象の発生頻度等を加味して考慮の必要性を検討している。外部事象については代表的なものとして、地震、波・津波、竜巻等を想定しているが、今後、他の自然現象および人為事象についてさらに整理を進め、既評価や規格の有無を確認していく。陸上送電設備が近隣に存在するか等、経済的な観点からも検討を行う予定である。また、評価に必要なデータの有無の確認も並行して実施しており、現在は海上保安庁の「海しる（海洋状況表示システム）」等の公開情報を中心に調査を行っている。

#### 3.2. 浮体式原子力発電の安全設備

2021年度の検討では、既設最新型プラントの一つである ABWR を対象として安全設備のオプションを例示した。安全設備には、炉心溶融時にも溶融炉心を自然循環力等で冷却し環境に放射性物質を漏洩しない静的崩壊熱除去システムも含め、各オプションについて整理および選定し、課題を抽出した。

2022年度の検討では、将来の基本設計に向けて、既存炉プラント全体に対する要求事項の洗い出しを行い（表 2）、浮体式の安全系設備を中心とした具体的要求事項を検討する予定である。要求事項の検討では、設計基準事象および設計拡張事象に対する安全性の指標も考慮し、事故時の安全設備対応性能（表 3）や、安全設備の通常復帰可能点や設備機能維持の限界点等を含む安全性の評価（表 4）等、既存炉との比較を通して浮体式原子力の基本設計に向けた要求事項と評価項目を整理する予定である。なお、一部の安全系設備については、経産省補助事業である NEXIP イニシアチブ「社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」と連携して、概略評価を実施する。

表 2 要求事項の整理（イメージ）

| プラント設備全体で着目すべき<br>要求事項の指標（以下の項目は一例） |                  | 比較対象炉<br>（ABWR や<br>ESBWR 等） | 浮体式原子力           |
|-------------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|
| 設計の境界条件                             | ・ 出力<br>・ 発電単価 等 | 135 万 kW 等                   | 60 万 kW 等        |
| 運転性・保守性                             | ・ 運転時の異常な過渡変化の緩和 | 単一故障を考慮<br>等                 | ・ 同等<br>・ オンラインメ |

|                 |  |                                      |         |
|-----------------|--|--------------------------------------|---------|
|                 | ・ 電力負荷追従性 等  |                                      | メンテナンス等 |
| <u>安全関係（設備）</u> | ・ 事故時運転員操作対応不要・<br>余裕期間（グレースピリオド）<br>・ 過酷事故（SA）対策<br>・ 原子炉停止機能喪失（ATWS）対策<br>・ 確率論的リスク評価（PRA）<br>・ 動的/静的設備の組み合わせ・<br>区分分離設計 等 | ・ 事故後 3 日間<br>対応不要<br>・ 静的冷却系設備の設置 等 | 同等以上    |
| 炉心燃料            | ・ サイクル柔軟性<br>・ 原子炉出力密度 等   | 12~24 か月運転等                          | 同等      |
| 建屋・配置           | ・ 設計合理化<br>・ テロ対策<br>・ 陸上設置における特定重大事故等対処施設の離隔 等  | 航空機事故対策等                             | 要検討     |

※ABWR: Advanced Boiling Water Reactor, ESBWR: Economic Simplified Boiling Water Reactor, SA: Severe Accident, ATWS: Anticipated Transient Without Scram, PRA: Probabilistic Risk Assessment

表 3 安全設備の事故対応能力（イメージ）

| 評価すべき項目・事象（以下の項目は一例）                 |   | 比較対象炉<br>(ABWR や ESBWR<br>等)  | 浮体式原子力   |
|--------------------------------------|---|---|--|
| <b>■ 内の事象</b><br>・ 設計ベース<br>・ 設計拡張事象 | <b>■ 通常運転～異常な過渡～設計基準事象（DBA）</b><br>・ 原子炉冷却材喪失事故（LOCA）<br>・ 全交流電源喪失事故（SBO） 等<br><br><b>■ 重大事故に至るおそれのある事故（bdba）～過酷事故（SA）</b><br>・ 格納容器加圧・加熱<br>・ 水素/水蒸気爆発<br>・ 熔融炉心とコンクリートの相互作用（MCCI） 等 | ・ 判断基準への適合性（通常運転、過渡時：最小限界出力比 MCPR>1、DBA 時：燃料被覆管最高温度 PCT<1200℃）<br>・ 動的安全系機器の 3 区分設置<br>・ 評価項目への適合<br>・ 事故後 24 時間耐性等 | ・ 同等以上<br>・ 動的安全系機器 4 区分設置<br>・ 周辺の海水や自然循環を利用して半永久的に長期炉心・格納容器冷却を達成 |

|       |  |  |                         |
|-------|--|--|-------------------------|
| ■外的事象 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 航空機落下、嵐、地震、津波、テロ等</li> <li>・ 設計上の想定を超える事象に対する安全裕度を、既存炉のストレステスト等を参考に限界点や影響緩和策等を整理する</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 設備強度増強</li> <li>・ 7日間補給不要等</li> </ul> | 同等以上<br>要検討（設備対応が緩和可能等） |
|-------|--|--|-------------------------|

※DBA: Design Basis Accident, LOCA: Loss Of Coolant Accident, SBO: Station Blackout, MCPR: Minimum Critical Power Ratio, PCT: Peak Cladding Temperature, BDBA: Beyond Design Basis Accident, MCCI: Molten Core Concrete Interaction

表 4 安全性の評価等における検討事項（イメージ）

| 項目・評価指標（以下の項目は一例） | 比較対象炉<br>(ABWR/ESBWR等)  | 浮体式原子力  |  |
|-------------------|---|---|--|
| ■内的事象             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 炉心損傷頻度（CDF）</li> <li>・ 早期大規模な放射性物質放出頻度（LERF）</li> <li>・ 重要な事故シナリオの評価</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ CDF<math>\sim 10^{-7}</math>/炉年</li> <li>・ 全交流電源喪失</li> <li>・ 過圧破損等</li> </ul> | 比較対象炉に比ベリスク低下                                |
| ■外的事象             | 設計基準と重要機能が喪失する限界点を把握すべき外的事象 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 津波</li> <li>・ 地震</li> <li>・ 津波地震重畳</li> <li>・ 最終的な熱の逃がし場（ヒートシンク）</li> <li>・ 全交流電源喪失</li> </ul> | 原子炉および使用済み燃料プールを中心に、最も安全裕度の小さい設備を特定し限界点（クリフエッジ）を評価  | 設計基準と重要機能が喪失する限界点の考え方を整理し、浮体設計や運用方法における課題を抽出 |

※CDF: Core Damage Frequency, LERF: Large Early Release Frequency

### 3.3. 揺動関係

2021年度までの検討では、格納容器が小型である等の利点を有するBWRの炉心に着目し、揺動がBWR炉心内熱流動に与える影響検討、揺動の影響を考慮した高温高压条件下の実験計画を策定した。

2022年度の検討では、実験における重要な要素である揺動条件（周期・振幅：傾斜を含む）について、浮体式運用海域における外部条件（気象、波浪）や浮体構造並びに揺動抑制方策等の複合因子を勘案しつつ検討する予定である。また、揺動影響を受ける設備について、前記「3.2安

全設備の検討」と同様に、浮体式原子力への要求事項において揺動の影響を受ける項目を抽出・検討するとともに（表 5）、原子炉炉心以外の設備にも検討範囲を拡大し、揺動および傾斜がプラント設備並びにプラント運転操作に与える影響およびその対応策等について検討する予定である（表 6）。なお、NEXIP 事業で進められている炉心揺動関連の実験と適宜連携し、今後の揺動関連を中心とした実験・解析計画について提言する。

表 5 要求事項への揺動影響整理（イメージ）

| プラント設備全体で着目すべき<br>要求事項の指標（以下の項目は一例） |   | 揺動の影響・<br>懸念事項 |
|-------------------------------------|---|----------------|
| 設計の境界条件                             | ・ 出力<br>・ 発電単価 等  | △              |
| 運転性                                 | ・ 運転時の異常な過渡変化の緩和<br>・ 電力負荷追従性 等   | ◎              |
| 安全関係（設備）                            | ・ 事故時の運転員操作対応不要・余裕期間（グレースピ<br>リオド）<br>・ 過酷事故（SA）対策<br>・ 原子炉停止機能喪失（ATWS）対策<br>・ 確率論的リスク評価（PRA）<br>・ 動的/静的設備の組み合わせ・区分分離設計 等 | ◎              |
| 炉心燃料                                | ・ サイクル柔軟性<br>・ 原子炉出力密度 等  | ○              |
| 建屋・配置                               | ・ 設計合理化<br>・ テロ対策 等   | ◎              |

凡例：◎影響が大きいと考えられる、○影響があると考えられる、△影響が小さいと考えられる

表 6 主要設備に対する揺動の影響整理（イメージ）

| 対象システム | 懸念事項  | プラントを停止する<br>判断基準の考え方   | 対応策および今後の課題  |
|--------|-------|---|--|
| 原子炉炉心  | 炉心動特性 | 熱的裕度の大幅な減少<br>※2021年度 COCN 試<br>解析では縦揺 0.8G で通<br>常運転時に±3%程度の炉<br>心流量変動と評価<br>等 | ・ 通常運転や過渡状態の炉心評<br>価<br>・ 実験・解析の計画<br>・ 出力密度低減や最大線出力密<br>度制限等の裕度増加 |

|                                 |                         |                  |   |
|---------------------------------|-------------------------|------------------|---|
| 静的安全系<br>・タンク<br>・取水設備          | ・液面揺動（スロッシング）<br>・取水不十分 | 静的崩壊熱除去機能の維持が困難等 | ・システム解析、配置設計<br>・実験・解析の計画策定<br>・SA 時の動的機能維持評価 |
| 動的安全系<br>・注入ポンプ<br>・非常用ディーゼル発電機 | ・機械振動<br>・スロッシング        | 動的崩壊熱除去機能の維持が困難等 | ・システム解析、配置設計<br>・事故時の動的機能維持評価                 |
| タービン系・補助系機器<br>・主タービン<br>・取水設備  | ・タービン振動<br>・取水不十分       | タービン破損防止等        | ・回転体への影響取水機能維持評価                              |

#### 3.4. 浮体式原子力発電（炉型：BWR）のレイアウト検討

本件は、2021 年度からの継続件名であり、検討を進めているところである。詳細な検討結果については、最終報告書で報告する。

### 3.5. 建造場所・技術、保守場所

浮体式原子力発電の建造・保守については国内で事例がないため、建造方法がある程度具体化し、建造・保守を行う場所に求められる条件、必要となる技術、現状の課題を整理する。

浮体構造物は国内の造船所での建造を想定していることから、国内造船所のドックのサイズ(幅、深さ)・耐荷重、クレーンのスペック(吊上げ荷重、高さ)等の情報収集を行い、この結果を基に図4のように建造方法がある程度具体化し、建造場所および技術について現状と課題を整理する。また、浮体式原子力発電プラントの保守作業は基本的に洋上で実施可能な見込であるが、船体再塗装等の一部の作業でドライドックへの入渠が必要となるケースが考えられることから<sup>6</sup>、入渠が必要となる保守作業および入渠までに必要となる作業(曳航等)を抽出し、保守場所に要求される条件、技術、課題を検討する。

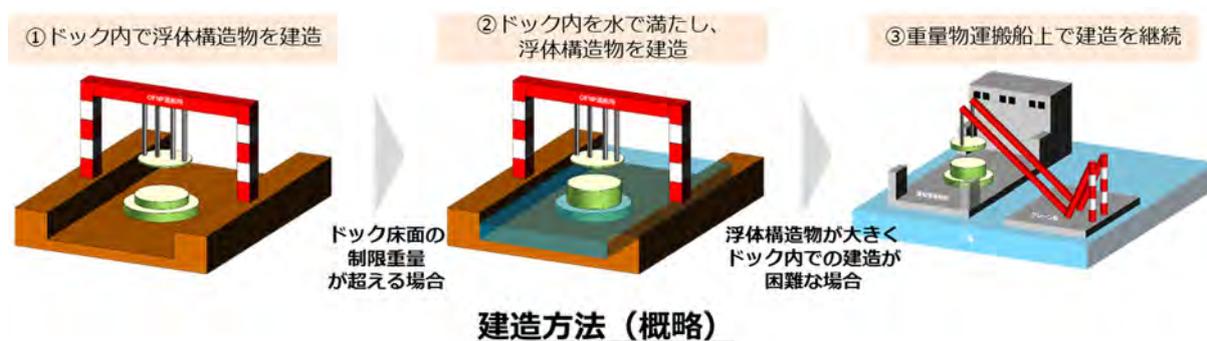


図4 建造方法具体化のイメージ

### 3.6. 長期運用を考慮した浮体構造物の設計・保守

浮体式石油・ガス生産貯蔵積出設備(FPSO)等の設計寿命は約30年と一般的な原子力発電の供用期間40年以上と比較すると短いため(ただし、近年、海外では寿命延長が数多く実施されており、また、2021年にはアメリカ船級協会から浮体式生産設備の寿命延長に関するガイド<sup>7</sup>が発行されている)、より長い供用期間を考慮し、設計や保守を進める必要があると考え、検討を進めているところである。

2021年度は図5に示すようにFPSO等の寿命延長に関する文献調査から、浮体構造物の長期運用を考慮した場合に課題になると考えられる浮体構造物の部位を抽出している。加えて、抽出された部位について、長期運用を考慮した場合の設計や保守時の対応を検討している。2022年度は、図5の①の2ポツ目に示すモノコラム型浮体構造物に関する文献を調査し、2021年度に抽出した部位の他に追加すべき部位がないかを確認し、追加すべき部位が確認された場合には図5の②と③に示す検討を実施することを予定している。現在、文献調査を進めているところである。

<sup>6</sup> 水中で施工可能かつ長い耐用年数を持つ塗料が開発されており、浮体構造物に適用できれば塗装作業のための入渠は不要となる

<sup>7</sup> ABS, "Guide for Life Extension of Floating Production Installations 2021", 2021.

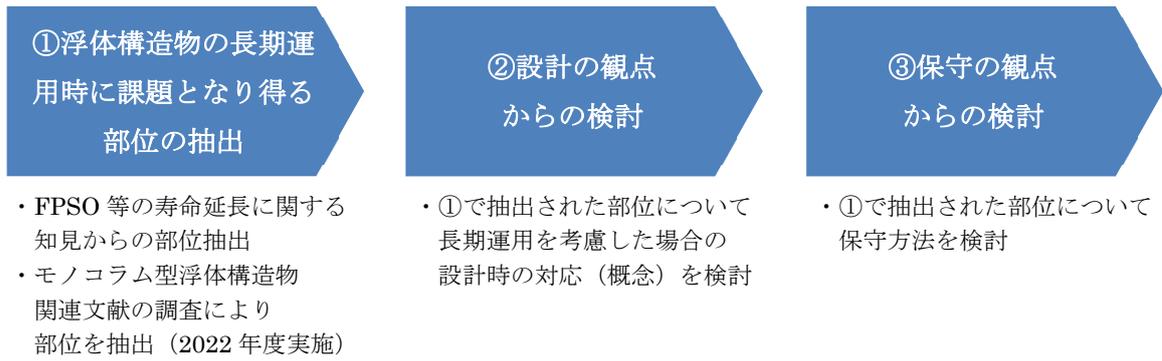


図 5 検討の進め方

### 3.7. 核セキュリティ

陸上の原子力発電と同様に浮体式原子力発電の核セキュリティ対策は非常に重要であり、現時点で浮体式原子力発電への適用が考えられる核セキュリティ対策を検討することとした。なお、武力攻撃事態等における国民の保護のための措置に関する法律（国民保護法）では、国は国民の保護のための措置を実施すること、武力攻撃に伴い放射性物質または放射線が原子力事業所外へ放出され、またはおそれがあると認める時には原子力防災管理者（原子力事業者が原子力事業所ごとに専任され、原子力防災組織を総括する者）は内閣総理大臣等に通報すること等が規定されている。

図 6 の通り、3つのステップに分けて検討を進めており、初めに浮体式原子力発電に対してテロ活動を実施する目的を定義し、次にその目的を達成するためにとる脅威の手段を検討し、最後に脅威の手段への対抗策を検討する方針である。なお、本検討では、陸上と浮体式の相違点があると考えられる外部脅威に焦点を当てている。

現在、3ステップ目の脅威の手段への対抗策について検討を進めている段階である。

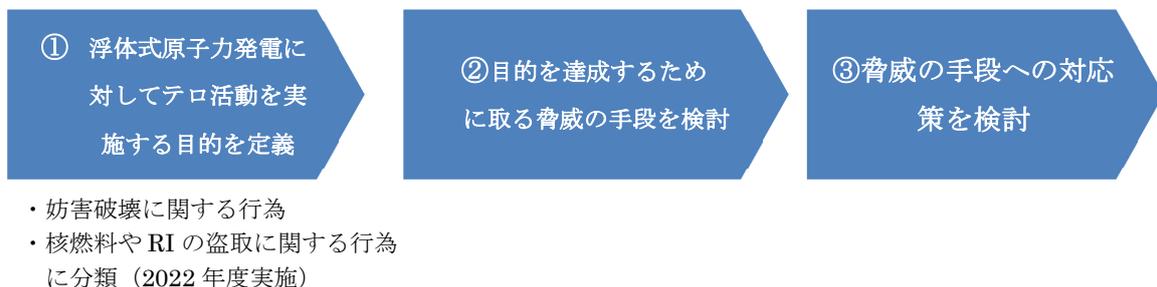


図 6 検討の進め方

## 4. 社会的側面からの検討

### 4.1. 社会的受容性

原子力発電所の社会的受容性に関する重要な要素として、高い安全性に加え、事故発生時の周辺住民の負担軽減策があること、これらをさらに高いレベルにするために継続的に改善していくことであると考えられる。

本プロジェクトでは、浮体式原子力発電の社会的受容性について検討することとしており、現在具体的な検討内容を定めるためにメンバーと様々な議論をしており、検討にあたり浮体式原子力発電の利害関係者の設定が必要なのではないか等の意見が出されているところである。

今後、最終報告書に向けて方向性を決め、検討を進めていく（本プロジェクトメンバーの専門家と議論することも予定）。

### 4.2. 本プロジェクトの情報発信

原子力発電のような大型プロジェクトの実現には様々な方と一緒に進めることが必要であり、情報発信が重要となってくる。また、情報発信により、多様な視点からご意見を頂くことができるため、今後の検討の参考にすることができる。以上のことから、本プロジェクトについて情報を発信していくこととした。これまでに、表 7 に示すように 5 件実施しており、また 2022 年 10 月には海洋開発や海洋環境を含む領域について、学術的・技術的な調査・研究を推進する学会である日本マリンエンジニア学会、2022 年 11 月には日本核物質管理学会においても発表を予定している。加えて、参加メンバー組織内での情報発信も実施している。その他にも国際学会での発表や雑誌への掲載等に向けた準備を進めており、今後も様々な場を活用して情報を発信していく。

表 7 情報発信に関する活動状況

| No. | 日付                      | 情報発信の内容   |
|-----|-------------------------|---|
| 1   | 2022/3/17               | 東京工業大学博士課程の原が日本原子力学会 2022 年春の大会において、「浮体式洋上原子力発電所の核拡散抵抗性評価手法の開発と評価」と題して発表した。         |
| 2   | 2022/6/20               | 日本原子力学会 若手連絡会 第 27 回勉強会において、東京電力 HD の中野と東京工業大学博士課程の原が浮体式原子力発電に関する検討状況について発表した。      |
| 3   | 2022/7/31               | 東京電力 HD の姉川が西日本新聞から取材を受け、新聞に記事が掲載された。   |
| 4   | 2022/8/12、<br>2022/8/16 | 東京電力 HD の姉川が電気新聞から取材を受け、新聞に記事が掲載された。  |
| 5   | 2022/9/8                | 日本原子力学会 2022 年秋の大会 熱流動部会企画セッションにおいて、早稲田大学の古谷教授、電中研の宇井、エネ総研の木野、東京電力 HD の佐々が国内における浮体式 |

| No. | 日付                           | 情報発信の内容   |
|-----|------------------------------|---|
|     |                              | 原子力発電の検討状況について発表した。   |
| 6   | 2022/10/27<br>(予定)           | 日本マリンエンジニア学会 第92回マリンエンジニアリング学術講演会において、東京海洋大学の賞雅名誉教授、井原助教らが、「浮体式原子力発電」開発の現状と浮体構造物の揺動低減対策について発表する予定である。 |
| 7   | 2022/11/21<br>～11/22<br>(予定) | 東京工業大学博士課程の原が日本核物質管理学会 第43回年次大会において、「浮体式洋上原子力発電所(OFNP)の3S特性と実現可能性：(1) 核セキュリティの概要」と題して発表する予定である。       |

## 5. 制度・運用面からの検討

### 5.1. 必要な法整備の検討

発電用原子炉の設置、運転等について規制する核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（以下、原子炉等規制法）では、発電用原子炉として浮体式原子力発電を対象に規制が定められておらず、法令の整備が必要である。そのため、本検討では、浮体式原子力発電の実現に必要な法令について明らかにするため、陸上の原子力発電や洋上風力発電等海洋構造物に適用される法令を整理（法律を中心に整理）し、その結果から浮体式原子力発電の実現のために整備が必要な法令を確認することとした。

本検討では、図 7 に示す 5 つの項目を設定して進めている。初めに、現状整理として、浮体式原子力発電に対する法整備の状況を整理すると共に、洋上風力発電（浮体式）、原子力船むつ、石油掘削リグに適用される法令の調査と陸上の原子力発電に適用される法律を整理することとしている。この結果を参考に、浮体式原子力発電に適用される法律を検討する（図 7 の④）。最後に、ここまでの結果から、立地計画から廃炉において必要な法整備を検討する（図 7 の⑤）。

現在、①～③が完了し、④に着手する段階である。ここでは、③の結果概要を報告する。図 8 に示すように、時系列（立地計画～廃止措置に加え、災害時）で法体系を整理しており、例えば、立地計画時には電源三法（電源開発促進税法、特別会計に関する法律、発電用施設周辺地域整備法）、環境影響評価法、電気事業法、工場立地法等を遵守して事業が進められ、原子力発電所の環境影響評価においては電気事業法の規定も遵守する必要がある。

今後、④と⑤の検討を進めるが、④の検討では浮体式原子力発電に適用されると考えられる法律を検討もしくは仮定し、⑤の検討において前述の時系列に沿って整備が必要な法令（基本的には命令を想定）を検討する予定である。

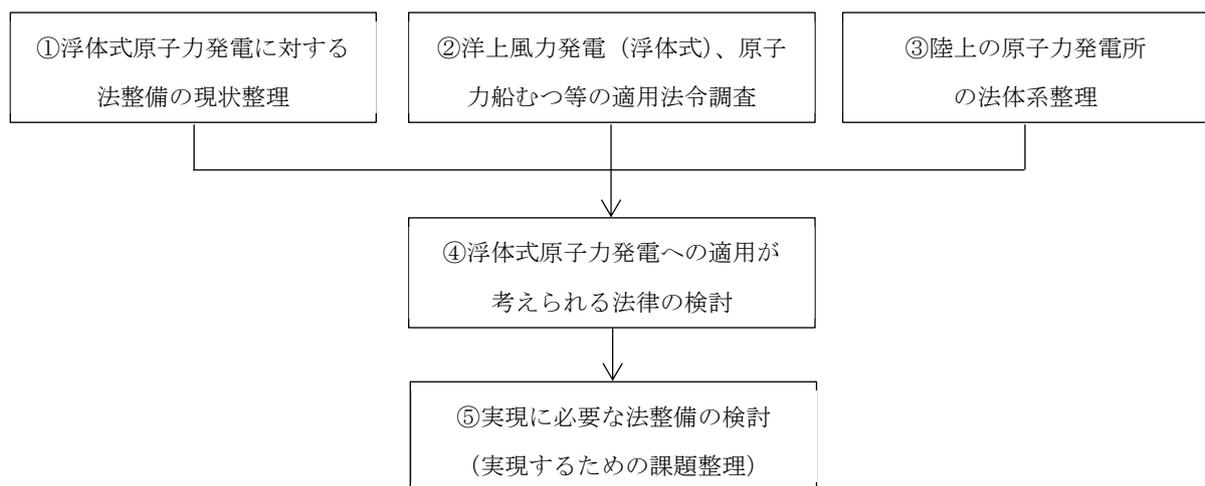


図 7 検討の進め方



図 8 陸上の原子力発電所の法体系整理結果（概要）

## 5.2. 発電所の運用方法

浮体式原子力発電の運用は国内で事例がないことから、陸上原子力発電、海洋構造物等を参考に浮体式原子力の運用方法（組織・体制、業務内容、必要な要員数、勤務形態等）を検討している。陸上の原子力発電所については、運転時・定期検査時の運用、緊急時対策に求められる要員を調査する他、より合理的な運用とすることを視野に入れ、プラント運転中の保全（オンラインメンテナンス）の導入が進んでいる海外の運用についても調査を行う予定である。また、原子力船むつの運用体制も大いに参考になると考えられる。海洋構造物に関してはブラジルのFPSO（浮体式生産貯蔵積出設備）を調査している。これらの結果を基に浮体式原子力発電における業務内容を整理し、運用の全体像を纏めていく。

## 6. 国際連携に向けた活動・知見収集

### 6.1. 国際連携の枠組み作りに向けた活動

2021年度に引き続き、国際連携の枠組み作りに向けた活動を実施している。浮体式原子力発電の提案者であるMITのMichael Golay教授らと2021年度の検討内容等を共有している。また、海外の主要な原子力事業者や類似した浮体式原子力発電を検討する企業との意見交換等も実施している。今後も引き続き活動を実施していく。

### 6.2. 浮体式原子力発電関連の知見収集

1958年に設立された日本原子力船研究協会では、日本原子力船開発事業団の設立による解散までの5年間に於いて様々な検討が行われ、合計46編の報告書に纏められており、国会図書館等に多数所蔵されており、その後の原子力船むつの廃船までの活動等については報告書に纏められている。また、電力中央研究所で検討されていた浮揚式原子力発電、ロシアのアカデミック・ロモノソフ等についても文献として纏められている。このように様々な文献として纏められていることから浮体式原子力発電の検討においても有益な情報を入手することができるため、2021年度から知見を収集しているところである。例えば、日本原子力船研究協会の「原子力船の保守」では、放射性廃棄物の処理、燃料交換、機器の保守について米国の原子力船サバンナ号の実船例を交えながら検討した結果が纏められており、サバンナ号計画においては使用済燃料貯蔵機能、汚染機器等の保守作業等をサポートする専用作業船を建造するとしていたこと等の情報を入手している。今後も引き続き活動を実施していく。

### 6.3. むつの経験共有・現地調査

1969年に進水した原子力船むつは、日本において唯一実現された洋上の原子力施設であり、むつで得られた知見等は浮体式原子力発電の実現において重要なものとなる。そのため、当時のむつ関係者から様々な情報を共有して頂くと共に、むつ科学技術館に展示されているむつの原子炉室や制御室等も参考にすることで今後の検討に活かす方針である。

## 7. 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、提言および施策実現について検討している段階であるが、現時点では、浮体式原子力発電を活用した産業競争力強化のために、COCNとして原子力小委員会やGX実行会議に本プロジェクトの成果を説明し、その有用性を訴えていくことが必要である。

また、浮体式原子力発電の実現のためには、今後十年前後の期間を要すると予想される。その間に原子力発電の設計、建設の経験を有する人材が減少していくことは不可避である。浮体式原子力発電の具体的な設計が行われる今後数年の期間は、経験豊富な世代から次世代を担う若手技術者に対し知見を引き継ぐための重要な期間となる。産官学は協力して、次世代を担う若手・学生に対して、イノベーティブな浮体式原子力発電の設計プロセスの魅力をアピールし、原子力発電を担う人材獲得・育成を達成していくことを提案する。

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