2022年秋の大会

熱流動部会セッション

国内における浮体式原子力発電の検討状況

Japanese Research Activity for Offshore Floating Nuclear Power Plant

（1）浮体式原子力発電に関する開発検討の全体概要

(1) Overview of Research Activity for Offshore Floating Nuclear Power Plant

*佐々 大輔，中野 宏之，大森 修一，後藤 章
東京電力ホールディングス株式会社

1. はじめに

世界各国で気候変動問題への対策が求められる中、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位置付けられている。東京電力福島第一原子力発電所事故（1F 事故）の経験と教訓を踏まえ、安全性を格段に向上できる原子力発電の一つとして、我々はマサチューセッツ工科大学の Michael Golay 教授らが提唱する浮体式原子力発電（Offshore Floating Nuclear Power，OFNP）に着目している。図 1 のように、OFNP は円筒型の浮体構造物に原子炉を搭載し陸地から十分離れた洋上に浮かせるシステムであり、既存の軽水炉および石油掘削リグ等の技術を参考としている。OFNP は特定の炉型に拘らず様々な炉を搭載可能な新たな原子力発電プラットフォーム（原子力発電所の設置場所）を提案するものであり、次の 4 つのメリットがある。

① OFNP を沖合遠方かつ水深の深い場所に設置することで津波の大きさを小さくでき、かつ、洋上に浮かべるため地震の直接的影響を排除できる。
② 原子炉停止後も発生する崩壊熱は原子力発電の大きなリスクであるが、図 2 のように OFNP では原子炉や熱交換器を海面下に配置し、動力なしで崩壊熱を海水に逃す設計が可能である。
③ OFNP を沖合 30km 以遠に設置することで UPZ（緊急防護措置を準備する区域、原子力発電所の半径 30km 圏）内の定住者が居なくなり、事故時の住民避難が不要となる。
④ 製造拠点と建設地点が分かれる陸上炉に対して、OFNP では工場において集中的に製造し、完成状態で係留場所に曳航・設置できるため、品質向上が図れる。

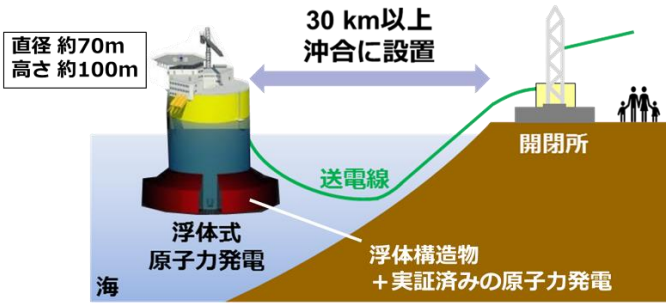


図 1　OFNP のイメージ

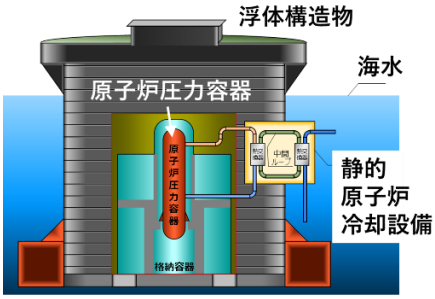


図 2　海水を利用した OFNP の安全系

このような OFNP の特長に着目し、2020 年度に産業力競争懇談会（COCN）において「浮体式原子力発電研究会」を立ち上げ、2021 年度からは COCN の推進テーマとして OFNP の実現に向けた検討を実施している。このプロジェクトには、原子力プラントメーカ、ゼネコン、エンジニアリング会社、造船会社、電力会社、大学、研究機関等が参画している。主な検討結果を以下に述べる。

2. COCN における OFNP 実現に向けた検討

2-1. 2020 年度の検討結果

2020 年度の研究会[1]では、OFNP 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た。その中から、優先度が高いと考えられる、規制要求に照らした課題抽出、

海上での地震動（海震）の影響、沸騰水型軽水炉（BWR）における浮体揺動影響、簡易的な確率論的リスク評価（PRA）による安全性向上度の推定に取り組んだ。

現行規制への適合性については、原子力規制委員会「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（設置許可基準規則）」、旧原子力安全委員会「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針（安全設計審査指針）」、海洋規制（原子力規制委員会「原子力船特殊規則」）に照らして課題・優位性を検討した結果、設計上対応すべき事項は残るものの適合可能な見通しが得られている。

海震の影響については、船舶の設計要件には海震への対策はなく、海震被害の報告自体が非常に稀であることを確認した。また簡易的なモデルケースによる海震の解析では、海底で地震が発生した場合、海面には縦波のみ伝わり横波の水平動成分はなくなることから、浮体式構造物への影響は緩和されることが示唆された。一方で、縦波は海水中を伝播するため、海底地質を調査の上、陸上同様に活断層近傍を回避した立地を考慮する必要性は残るが、万一新たに近傍に活断層や海底火山などが見つかった場合でも、設置場所を移動させること等でリスクを低減できる。

また BWR の場合には揺動に対する炉内のボイド率の変化や限界熱流束への影響があることから、文献調査及び核熱水力動特性計算による感度解析を行い、定性的には BWR 運転時の揺動の影響は小さいと評価している。ただし、安全性が確保できることを定量的に示すためには、実機を想定した熱流動実験の実施が望まれることから、引き続き、実験も行い確認していく。

簡易的な PRA により OFNP の安全性向上の程度を推定した。内的事象 PRA では、海水を最終ヒートシンクとする自然循環型の非常用復水器の設置により、全炉心損傷頻度を 10^{-7}/炉年オーダーに低減できるとの結果が得られている。また、津波のリスクはほぼ無くすことが期待できる一方、海震や波浪に関しては評価のために知見を収集する必要が残っている。

2-2. 2021 年度の検討結果

2021 年度は浮体式原子力発電の実現に向け、スケジュール・建造費、OFNP の安全設備、洋上保守方法、1F 事故を教訓とした安全性向上策、国際連携や国際的な規制等、15 項目の検討を行った[2]。主な検討結果を以下に述べる。

初号機の運転開始までに要する期間については、OFNP の規制整備、立地調査、設計、規制審査、建造、検査の期間を評価し、米国で整備されている設計認証制度を活用する場合は 17 年、設計認証制度を活用しない（日本の現行規制）場合は 14.5 年と評価した。なお、2 機目以降は、設計認証を活用できる場合、基本設計、詳細設計が省略されるため、運転開始までに要する期間は約 9 年にまで短縮されると考えている。

OFNP の建造費・建設費については、陸上炉と相違する部分（具体的には OFNP の「浮体構造物」および「海底送電線」と陸上炉の「土木・建屋部分」）に関する費用を概算的に評価した。その結果、OFNP の浮体構造物の建造費は 390～560 億円程度、海底送電線の建設費は 304～475 億円程度で、合計数百億円から一千億円程度に対し、陸上炉の土木・建屋部分の建設費は 825～1375 億円程度であったことから、OFNP の建造費および建造費は陸上炉と大きく変わらないと考えている。

OFNP の安全設備設計では、BWR を対象として、陸上炉をベースケースとして検討を行った。図 3 に安全系の区分分離の一例を示す。設計基準事故（DBA）時に期待する動的安全系は、安全上の区分分離を図るとともにオンラインメンテナンスを可能とするよう、図 3(a)のように 4 区分とすることを考えている。また過酷事故（SA）には静的機器で対応する設計とし、図 3(b)のように SA 時に期待する静的安全系は 2 区分としている。また、安全系の構成はこれで確定ではなく、例えば、非常用復水器(ICS)を SA に至る前（DBA、炉心損傷に至るおそれのある事故）の段階から使うこと等、安全性向上の余地が残されていることから、より安全で効率的な系統構成について更なる検討を進めていく。

OFNP の点検保守作業については、浮体式石油・ガス生産貯蔵積出設備（FPSO）と同様に基本的に洋上で実施可能と考えられるが、船体の再塗装や大型補修等は洋上での実施が難しくドライドックでの作業が必要となる。また、燃料交換等の OFNP に大きな揺動があった場合にリスクが大きい作業については、揺動の大きさ等を評価した上で実施可否の検討を行う必要がある。

また、OFNP の供用期間は一般的な原子力発電と同じく 40 年を目指しているが、これに対して FPSO の設

計寿命は通常 25 年程度と比較的短いことから、浮体構造物等の長期運用を考慮した設計・保守を検討した。浮体構造物等の腐食・疲労を考慮した設計とすることや、防食技術の活用、また、係留索については基本的には供用期間中の交換が必要と考えられるが、これらの対策により、長期運用が可能になると考えている。

OFNP の位置保持技術の検討では「円筒型の浮体構造物」、「沖合 30km」、「水深 200～1000m」において使用可能な技術を調査した結果、多点係留と自動船位保持装置（DPS）が適当と考えられる。また、共通要因による位置保持機能喪失を回避する観点から、多点係留と DPS の両方を採用し多様性を持たせること、両方が使用できない場合に備えて非常用の錨を準備することが考えられる。

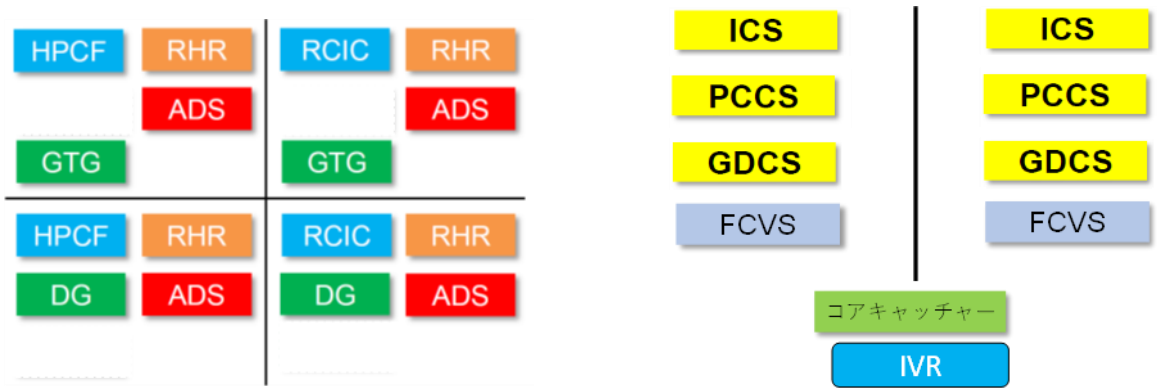
揺動による原子炉（炉型：BWR）への影響を確認するための評価、実験については、浮体全体の上下左右の揺動と浮体中心軸に対する炉心の傾きにより、限界熱流束（CHF）の減少そしてボイド率（炉心出力）が変化する可能性があることから、揺動または傾き、並びにそれらの重畳が想定される実炉運転条件範囲（流量変動、出力変動）での CHF、ボイド率を測定する試験が必要と考えている。

また、1F 事故時において原子炉減圧操作と原子炉水位計測が困難であったことを教訓として、過酷事故環境における減圧操作および水位計測について有効な施策を取り纏め、安全性の向上を図った。

国際連携の枠組み作りに向けた取り組みとして、国際原子力機関（IAEA）主催で 2021 年 5 月に開催されたウェビナー”Advances in Reactor Technologies for Marine-based Small Modular Reactors” において、OFNP に関する中国、韓国、ロシア、米国の各機関の検討状況が紹介され、情報収集および意見交換を行った。また、経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）および IAEA とも OFNP に関する意見交換を行っている。

国際規制に関しては、放射性廃棄物の海洋投棄について、ロンドン条約・議定書、国内法（原子炉等規制法）を調査し、通常の運用に伴う放射性廃棄物の放出は海洋投棄に当たらないことを確認した。一方で、規制上問題はなくとも様々なステークホルダーとの調整により放出が認められない可能性はあるが、陸上炉の運用実績から、運転中に発生する放射性廃棄物を OFNP 内に貯蔵し定期検査中に陸上に移送する運用（陸上炉と同等の運用）により対応可能と考えている。

OFNP に関する知見収集も実施しており、過去の原子力船「むつ」等の文献を調査し、原子力船の耐衝突構造や、沈没時に水圧による格納容器（PCV）破損を防止する機能（圧力平衡弁）等、OFNP の安全性向上に有効な知見が得られている。



ADS：自動減圧系
DG：非常用ディーゼル発電機
GTG：ガスタービン発電機
HPCF：高圧炉心注水系
RCIC：残留熱除去系
RHR：残留熱除去系

ICS：非常用復水器
FCVS：フィルターベントシステム
GDCS：重力落下式炉心冷却系
IVR：炉心溶融デブリ炉内保持
PCCS：静的格納容器冷却系

(a) DBA に対応する安全系(4 区分)　　(b) SA に対応する安全系(2 区分)

図 3　OFNP（炉型：BWR）における安全系区分分離の一例

3. NEXIP における OFNP の成立性に関する研究

COCN における OFNP 検討課題の一部については、2021 年度より NEXIP (Nuclear Energy×Innovation Promotion)事業の一つである資源エネルギー庁の「社会的要請に応える革新的原子力技術開発支援事業」において補助を頂き、研究を進めている。NEXIP における研究は電力中央研究所が幹事となり、メンバーはプラントメーカ、電力、大学、研究機関で構成されている。2021 年度は、浮体揺動における BWR の成立性を確認するための熱流動実験等を実施した。

4. 今後の予定

2022 年度も COCN の推進テーマとして、OFNP の安全設備、レイアウト、揺動等に関する検討を継続するとともに、運用する海域および運用方法、建造・保守の場所および方法、社会的受容性等、OFNP の実現に向けた更なる検討を行っている。また、NEXIP における研究も継続しており、引き続き OFNP の成立性確認に向けた取り組みを進めていく。

参考文献

[1] 産業競争力懇談会,『2020 年度 研究会 最終報告【浮体式原子力発電研究会】』(2021), http://www.cocn.jp/report/3fa29452533b880e1321c00eeaea0e9be78e40f0.pdf

[2] 産業競争力懇談会,『2021 年度 プロジェクト 最終報告【浮体式原子力発電】』(2022) http://www.cocn.jp/report/2d24cd957f9f32f2f975ae1d37b5f75f257037b4.pdf

---

*Daisuke Sasa, Hiroyuki Nakano, Shuichi Ohmori, Akira Gotoh
Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.