

■ 話題を追う

浮体式原子力発電所



師岡 慎一 氏

Shinichi MOROOKA

早稲田大学
名誉教授
工学博士

● INTERVIEWER
北山信次（当社執行役員調査部長）

浮体式原子力発電所とは

カーボンニュートラル社会とエネルギーセキュリティを両立させるため、安全性の向上が期待される浮体式原子力発電所への注目が高まっています。産業競争力懇談会（日本の産業競争力強化のための政策提言活動を行う組織）において 2021 年度、2022 年度と 2 年連続で浮体式原子力発電が取り上げられました。そのメンバーの一員であった師岡先生に、本日はお話を伺いたいと思います。

——浮体式原子力発電所について伺う前に、原子力発電について教えてください。

師岡 まず原子力発電の原理からご説明しま

す。火力発電と同様の原理で、蒸気でタービンを回転させ、その回転力で発電機を回し電気を作っています。水から蒸気を作り出すプロセスや放射性物質を生み出す点において違いがあります。火力発電では石油や天然ガスなどを燃やし、そのエネルギーで水から蒸気を発生させる一方、原子力発電は核分裂を利用します。核燃料では中性子がウラン 235 に衝突し核分裂で莫大なエネルギーそして放射性物質が生まれ、このエネルギーを発電に利用しています。

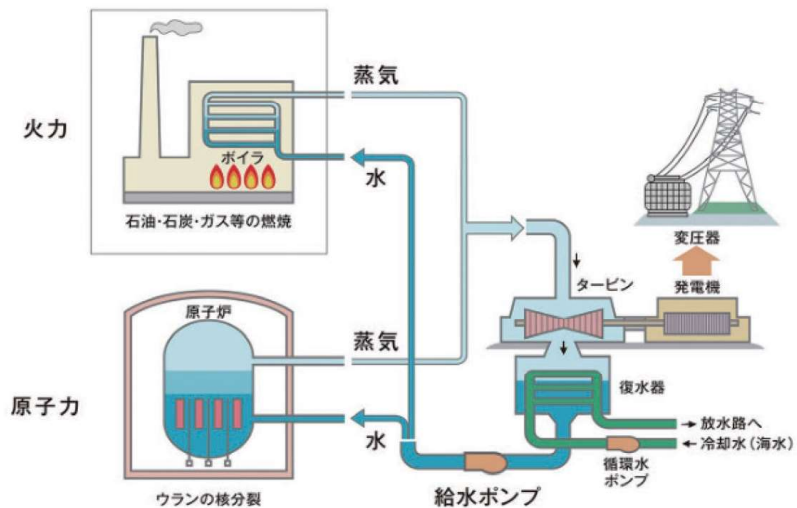
核燃料では、核分裂反応が停止しても、核燃料に蓄積されている放射性物質からエネルギーが発生します。これを崩壊熱と言いまして、この崩壊熱をどのように冷却するかが安全の重要

ポイントです。

——どれくらいのエネルギーなのでしょうか。

師岡 ウラン 235 が 1g に対して、おおよそ石炭では 3t、石油では 2,000L 相当のエネルギーです。非常に大きなエネルギーを生み出すことがわかるのではないのでしょうか。火力発電（原油）では燃料を輸送するためタンカーを使い、オイルロードあるいはシーレーンと呼ばれる中東から片道約 1 万 2,000km の道程を数十日かけて日本へ運んでいます。しかも火力発電では燃焼した分、燃料を補給する必要があります。それに対し原子力発電では、年 1 回定期検査が必要ですが、核燃料の交換は数年間で 1 回程度とエネルギーセキュリティの面で原子力発電が優れています。

■図表 1. 火力発電と原子力発電



出所：一般財団法人日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」より抜粋

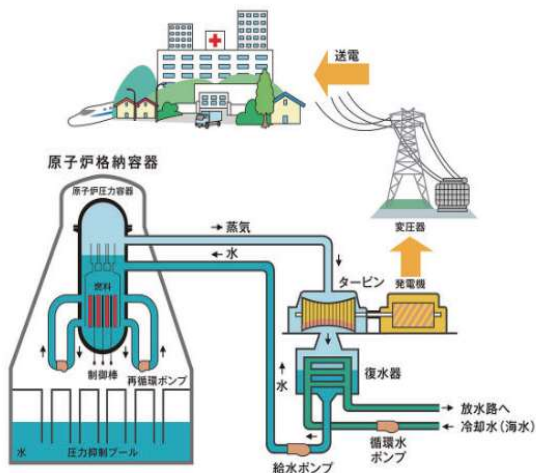
——原子力発電の効率性についてよくわかりました。では本日の本題であります浮体式原子力発電所について、まずはメカニズムについて教えてください。

師岡 陸の上に設置する原子力発電所と発電原理は全く同じです。陸上ですと岩盤に杭を

■図表 2. BWR と PWR

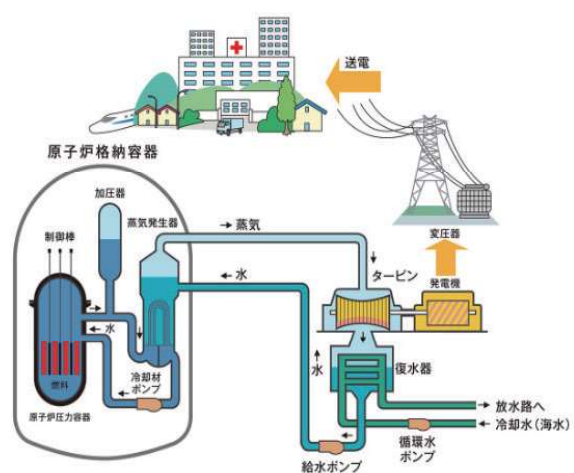
BWR（沸騰水型）

原子炉の中で水を沸騰させて蒸気をつくり、その蒸気でタービンを直接回す方式。東日本を中心に採用。



PWR（加圧水型）

原子炉内の圧力を高くすることで水を沸騰させず熱湯にし、その作られた熱湯を蒸気発生器に送り、別の系統の水を蒸気に変えて、その蒸気でタービンを直接回す方式。西日本を中心に採用。



出所：一般財団法人日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」より抜粋。BWR・PWRの説明は丸三証券調査部作成

立てその上に設置しますが、浮体式原子力発電所は円筒型の浮体構造物の中に原子力発電所を設置して海に浮かべます。陸の原子力発電所ですとBWR（沸騰水型原子炉：Boiling Water Reactor）とPWR（加圧水型原子炉：Pressurized Water Reactor）の主に2つの方式があり、浮体式でもどちらの方式でも検討されています。今回はBWRの場合を検討しました。——BWR、PWRの違いを教えてください。

師岡 BWRは米ゼネラル・エレクトリック（GE）が開発した方式でして、PWRはかつて東芝が買収し、残念ながら手放した米ウエスチングハウスが開発した方式です。

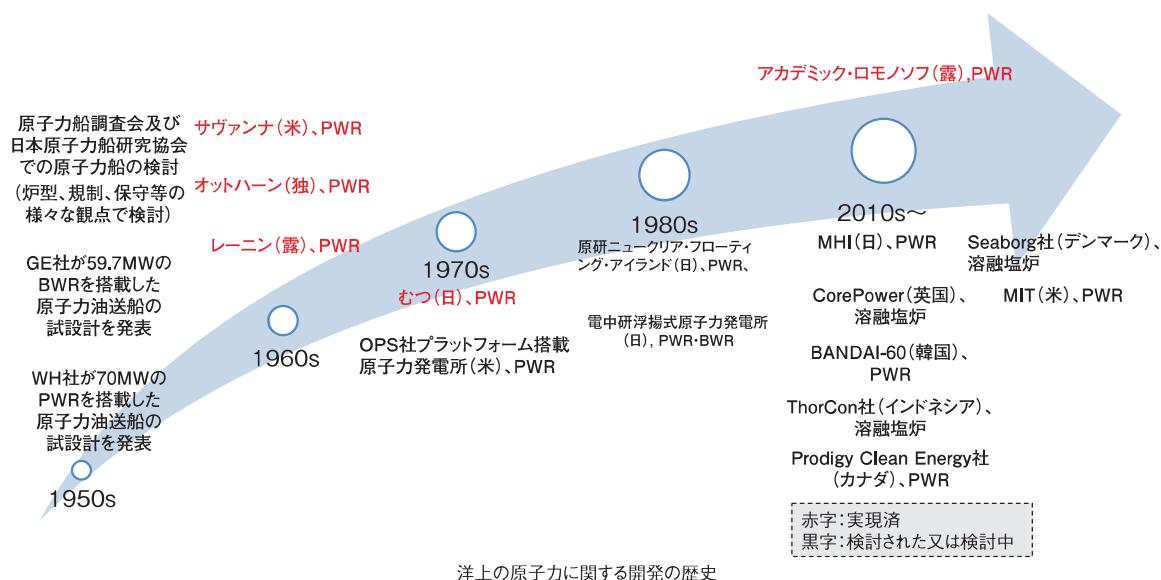
BWRは原子炉の中で蒸気を発生させて、その蒸気を直接タービンに送って発電します。一方PWRでは原子炉内で発生した高温高压の水を蒸気発生器へ送り、そこで蒸気を発生させてタービンに送り発電します。PWRでは炉心を通る水が格納容器内だけを循環している点がBWRとの大きな違いです。日本ではBWR、PWRがほぼ同数建設されていますが、世界の

原子力発電所はPWRが主流となっています。これから新たに建設・製造が予定されている世界各国の原子力発電所もほとんどがPWRです。——いつから浮体式原子力発電所は提唱されているのか、歴史的な背景を教えてください。

師岡 スタートは1950年代からの原子力船や原子力潜水艦、空母の検討です。1960年代には海外（米、ドイツ、ロシア）で原子力船が実現し、1970年代にウエスチングハウスが考案したプラットフォーム型浮体式原子力発電所が有望視され多くの発注がなされましたが、電力需要の落ち込み、コスト面などから実現しませんでした。日本ですと残念ながら廃炉となりましたが、原子力船「むつ」が実績として挙げられます。その後1980年代では日本の電力中央研究所や日本原子力研究所においては検討を続けていました。

本検討では、マサチューセッツ工科大学（MIT）のMichael Golay教授らが提唱した津波に対し優れた耐性をもつ浮体式原子力発電所（Offshore Floating Nuclear Power Plant, OFNP）を参考に検討を進めています。

■図表3. 浮体式原子力発電所の歴史



画像提供：師岡教授



——現在、浮体式原子力発電所が稼働している国はあるのでしょうか。

師岡 ロシアがあります。アカデミック・ロモノソフと呼ぶ国営原子力発電所で、2020年5月に営業運転を開始しています。方式としてはタグボートで引く形で電力は約7万キロワットと小さいです。そのほか、韓国や中国、インドネシアなど様々な国が検討しています。中国は陸上の原子力発電所の多くの建設・運転計画があります。今後浮体式原子力発電所においても積極化する可能性があるかもしれません。

メリットは安全性の高さ 技術的には既にクリア

——メリットはどんなところでしょうか。

師岡 原子力発電所では国際的なルールとしてUPZ（Urgent Protective action planning Zone：緊急時防護措置を準備する区域）と呼ばれる原子力災害時に放射線被ばくによる影響のリスクを最小限に抑えるため避難などの緊急防護措置を行う区域が定められています。日本の場合、このUPZが原子力発電所施設から概ね半径30kmの区域とされていて、浮体式原子力発電は沖合30km以遠への設置を考えていますので、住民の負担を軽減できると考えています。また、水深の深い位置に設置しますので、津波や地震が起きても影響を受けにくいのです。加えて、設備を集中的に工場で製造しますので、品質向上が図れます。プレハブのイメージに近いといえます。何か事故が起こったときに周りに大量にある水（海水）を冷却に使える利点があります。ただ思い出していただきたいのは、福島原子力発電所の事故が起こったとき、非常用発電機が動かず電気が使えなくなりました。浮体式原子力発電所では核燃料が設置されている炉心が海面よりも低い位置に設置しますので、重力つまり自然力が見えなくなるため電気がなくても冷却でき、加えて、炉心を冷却できる

海水が無限にあること、これが大きなメリットでしょう。

——コストの面ではいかがでしょうか。

師岡 試算で申しますと、陸上とほぼ変わらない見通しです。ただしセキュリティにかかるコスト増加の可能性があります。建設には原子力規制庁の厳格な安全審査を経ます。最近の世界情勢からセキュリティ面、例えば海の上に建設しますから外国船が来て乗っ取られたらどうするか、魚雷や潜水艦、ドローンで攻撃されたらどうするのか、こういったセキュリティの問題を解決する必要があります。その費用がどのくらいか、まだ不透明です。この点は、原子力規制庁そして政府と密接な連携をとり設計検討する必要があると私は考えています。

——ちなみに日本で可能な地域としてどの辺りを想定されているのでしょうか。

師岡 どこを想定するという話は今のところありません。まだ検討段階となります。

——技術的には今でも建設可能という理解でよろしいですか。

師岡 はい。今の技術で対応できると思います。ただしもう少し考えないといけない部分として台風などにより海面が揺れた場合、核分裂、核燃料の冷却がきちんと行えるかの検討が必要です。早稲田大学の古谷先生がシミュレーションで、大きな問題はないことは確認していますが、そのシミュレーションが正しいか、検討漏れがないかどうか、実験などで実証する必要があります。

——送電の部分も対応可能でしょうか。

師岡 既存設備において長距離の海底ケーブルが敷設されていますので、その技術を活かすことが可能です。メンテナンスの場合も、関連企業と電力会社の検討で、洋上でも可能とのことですが、実験などによる確認は必要です。例えば、万一、円筒型の浮体構造物外面の補修が洋上ではできない場合、ドックまで運ぶ必要があ

■図表 4. 浮体式原子力発電所



【産業競争力懇談会2022年度プロジェクト最終報告】
ページii 図2

画像提供：師岡教授

り、洋上に設置する場所の近くにはドックがなくてはならないなどの条件も踏まえる必要があります。

——陸上の原子力発電所に比した安全性の違いはどうでしょうか。

師岡 原子炉の原理のところでお話ししましたように、核分裂が停止しても核燃料から出てくる崩壊熱の除去こそ原子力発電における安全性の重要なポイントと考えられています。つまり、核燃料を長期間にわたり水で冷やすことが重要であり、そのために大量の水が必要となります。福島第一原子力発電所事故における核燃料の溶融は、崩壊熱の冷却に失敗したためです。我々はこの教訓を生かす必要があります。その解決方法の1つとして浮体式原子力発電所のまわりにある無限にある海水による冷却がクローズアップされてきていると思います。

——海水を冷却で使用する場合には、放射能漏れリスクはないのですか。

師岡 絶対ないとは言えませんが、原子炉に水(海水)を入れる時は放射能が漏れないように、原子炉を囲んでいる格納容器を二重にして放射能は外に漏れないようにするコンセプトを考えています。

——日本の造船会社などがイギリスの新興企業で浮体式原子力発電所に取り組むコアパワー社へ出資しています。日本の造船技術が活かせる期待があると推測するのですが、先生のお考えをお聞かせいただければと思います。

師岡 報道によりますと、コアパワー社が使用を考えている原子炉は溶融塩炉(MSR: Molten Salt Reactor)で、冒頭で申し上げた2方式(BWR、PWR)とは異なるアプローチです。こちらは水を使うのではなく塩を加熱し、液体にしてウランを溶け込ませる方式と報道されています。私見ですがMSRは日本での発電実績がなく、世界でも開発段階であり現状では早期の実現は難しいのではと考えています。ただし、浮体式原子力発電所の開発には、日本の造船技術は必要不可欠と考えています。

——小型モジュール炉SMR(Small Modular Reactor)をよく耳にいたします。安全面などで有望なのでしょうか。

師岡 かなり有望と思います。多くのSMRは電気を使わず自然循環により電気を得ています。分かりやすくお風呂で例えますと、暖かい湯が上昇し冷たい水が下降してぐるぐる回る自然循環の仕組みを応用しています。ただし、



SMR の発電量は約 30 万 kW 以下と一般的な原子力発電所の約 100 万 kW に比べ小さい点が経済性という面ではネックですが、非常に良い仕組みだと思います。

社会的な受容性が必要

——産業競争力懇談会の資料を拝見いたしました。先生はメンバーの一人として参加されておられましたが、現状における浮体式原子力発電所の実現時期をどのようにお考えでしょうか。

師岡 なかなか難しい質問ですね。私の見立てでは現在、原子炉の再稼働そして福島原子力発電所の対応にかなりのエンジニアが投入されていますので、それと並行して設計開発ができるかどうかです。並行してできると仮定しましても、基本設計やレイアウト、詳細設計などに約 10 年かかります。加えて製造に約 5 年かかり、並行して実施したとしても少なくとも 15 年程度かかり 2040 年代が目途になるかと思います。ただし並行してできるか、エンジニアのリソースの問題、またセキュリティの問題、政治的な問題があります。そして、実証試験や設計建設にもお金がかかり、電力会社主導で全てを行うのは難しく、造船業などの技術も必要ですので、政府の援助を得て日本全体で行うのが良い方法と思います。

——将来の実現において必要なことは何とお考えでしょうか。

師岡 社会的な受容性が重要と考えています。社会的受容性とは信頼です。信頼を必ず確保しないと、このプロジェクトは実現しません。ではどうやって信頼を確保するか、情報の透明性を高めることをやらなければなりません。これまでのやり方のように、決まってから説明ではもう通じないと思います。基本設計や詳細設計の一項目に社会的受容性を取り入れ、利害関係のない社会的受容性の専門家をメンバーに入れ

て、周辺住民の方の意見をしっかりと吸い上げる役割を担う。このプロジェクトが成立するかどうかは社会的受容性が成立するかどうかなのではないかと思います。

カーボンニュートラル社会の実現に向けて原子力発電は必要

——2050 年のカーボンニュートラル社会に向けて、原子力発電の位置づけをどのように先生はお考えですか。

師岡 やはり原子力発電が今の状況だと必要だと思います。私は再生可能エネルギー技術も地球温暖化を考えれば必要不可欠と思いますが、現状では天候に左右されます。やはり、ベース電源として、またバックアップ電源として原子力発電所が必要だと思います。国のエネルギー政策は人の生命に関わりますので、火力発電や再生可能エネルギー、原子力発電など色々なエネルギーを組み合わせる電力をまかなうのが理想と考えています。そのためには人材が必要です。ここをどうやって担保していくか、大きな課題と認識しています。福島原発以降、新しいコンセプトで原子力発電を考える機会が減っていましたが、浮体式原子力発電所のような新しいコンセプトを考えることに学生など新たな人材が原子力発電へ興味を持ってもらうきっかけとなっています。これから福島の原子力発電所の廃炉に向けた取り組みが長期間かかりますと、現在携わっておられる多くのエンジニアは退職してしまい、新たに人材育成をしなくては成り立ちません。そこで、今回のチャレンジこそ人材育成において役立つと思います。実際、浮体式原子力発電所の検討は若い技術者が牽引しています。

——これから原子力発電に携わる新たな人材育成に期待しています。本日は大変貴重なお話を、誠にありがとうございました。

(対談日：8 月 25 日 宮原)