

小型モジュール炉 (SMR)は未来を拓くか —期待される日本の技術—



福島事故以前は原子力発電は、日本の発電量の1/3を占めていた。しかし、福島第一原子力発電所事故が発生し、安全性に関する規制が飛躍的に厳しくなり、大型炉の建設コストが世界的にも大幅に上昇した。また、大型炉の需要も一巡し、先進国では大型炉は運転期間延長のフェーズに入っていて新設は少ない。IEAの分析によれば、新規建設炉の発電コストは、運転期間を延長した既存炉の発電コストの2倍になるとされる。

原子力の必要性という点では変化はないが、最近になって原子力利用の多様化や融通性、コスト低減が強く要請されるようになってきた。以上を背景に小型モジュール炉への関心が最近高まっている。小型モジュール炉は負荷追従運転がしやすく再生可能エネルギーの導入とも親和性が高い。一方、日本では大型炉を集中して建設し全国に送電した方が経済的との意見が依然として主流である。しかし世界の情勢を見れば今後小型モジュール炉を導入する可能性が十分にあると考えられる。

小型モジュール炉 (SMR)とはどんなもの (定義)

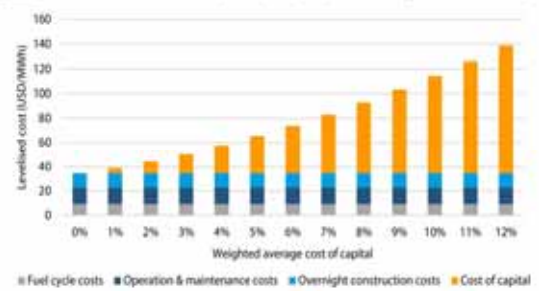
小型モジュール炉 (SMR: Small Modular Reactor) とは、IAEAによると、電気出力が概ね300MWe (30万キロワット) 以下で、1モジュールで、または、いくつかのモジュールを組み合わせて建設することも可能な炉と定義されている¹⁾。また、基本的に商用利用を目的とし、研究炉などは含めない。同一のインフラで隣接した場所で複数基設置できるものとする。また、冷却材は軽水でなくてもよい。しかし本報では実用性の高い軽水冷却炉に限定して述べる。

革新的技術の採用による発電コストの低減策とは

スケールメリットを追求し、発電コストの低減を図ってきた大型炉に比べ、発電コストは上昇する可能性があるが、以下のような革新的な技術の導入によって、大型炉並みに抑えようとしている。

- **設計の簡素化**：ポンプなど動的機器を使わない静的な安全機構の採用により安全設備等を大幅に簡素化
- **工場生産方式**：工場内において、原子炉全体を複数、同一設計で製造。品質管理も徹底が図りやすく効率的な生産によって、コストを低減
- **建設期間の大幅な短縮**：工場において原子炉を始めとしてプラント機器の大部分を製造することによりサイトにおける建設工程を大幅に減らし、建設期間を大幅に短縮
- **メンテナンス作業の削減**：安全設備等機器の削減により、メンテナンス作業も削減
- **運転管理の合理化**：静的機器の採用、設備の削減により運転員の負担を軽減し、一つの制御室で複数ユニットの制御が可能 (規制制度に依存)
- **調達資金金利の低減**：機器供給体制を簡素化することにより、下請け構造が簡素化され、製造・建設における遅延等のリスクが低減。複数ユニットを設置する場合も、小規模な投資を段階的に積んでいくことができ、投資リスクを削減。国による保証など²⁾
- NuScaleは³⁾大型先進炉と比較して競争力のあるオーバナイトコスト (金利抜き建設コスト) であり、最初のプラントの LCOE (平準化発電原価) は65米ドル/Mwh (6.8円/kwhと105円/ドルとして) されている。

Figure 37: LCOE of a new nuclear power plant project according to the cost of capital



Note: MWh = megawatt hour. Calculations based on OCC of USD 4 500 per kilowatt of electrical capacity (kWe), a load factor of 85%, 60-year lifetime and 7-year construction time.

安全性

福島事故は電源喪失などで崩壊熱の除去に失敗して炉心溶融に至り住民の避難まで必要になった。小型炉の特徴を生かし、例えば、ポンプなし、外部電源なし、外部から冷却水を入れなくても格納容器の外側から炉心を冷却できるなど安全性は各段に高まっている。(図 Nscale³⁾の例)しかし、格納容器内に原子炉や制御棒装置、蒸気発生器を組み込んだ一体構造であり、検査、点検などは課題であろう。

安全規制

SMRにおいては、これまでの大型軽水炉に比べ革新的な技術が採用されることから、大型炉の安全規制がそのまま適用できるわけではない。

安全審査

現在、米国においては、NRCにおいて具体的な審査が進められており、その結果が注目される。

DOEにおいては、新しい原子力技術に関する許認可対応を支援する制度 (LTS (Licensing Technical Support program)) を設け、NuScaleの軽水型SMRをその支援対象とした。

NRCは、NuScale (アイダホ国立研究所内に建設予定) の設計認証を受理し審査中。2018年4月に安全審査の第1フェーズを修了した。最後の第6フェーズを2020年9月に審査を終了するとのスケジュールを公表している。



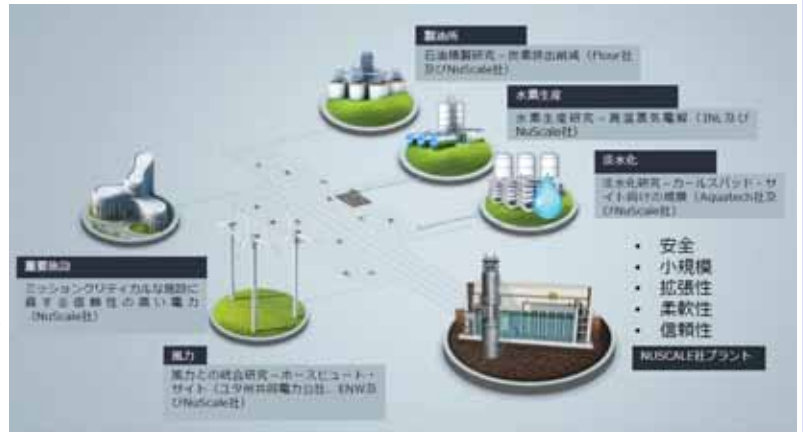
¹⁾ 2基すべてのモジュールについて、非常に保守的な試験に基づいて30日試験
²⁾ 内閣府は電源システム設計により、EPRAS標準化を進めるとの1日調査パネラーが発表・特別出版中

SMRの多様な用途

以下のように多様な用途に利用できる可能性がある。⁴⁾

サイト選択の可能性が広い (図はNuScale資料より)

- a) 地上、地下、海上、海底
 - b) 送電線、冷却水などインフラの無い地域にも設置できる
 - c) 孤立した島での独立した電力システムとして使える
- その他、以下の用途がある。
- ・ 地域暖房
 - ・ 脱塩、石油生成などの化学プロセス、高温ガス炉では水素製造も可能で、製鉄にも使用可能
 - ・ 船用炉 (例: 貨物船、病院船、電源船、砕氷船、原潜)
 - ・ 宇宙炉 (原子力推進と滞在先での電源)



更に、変動する再エネ電力の調整電源としての役割 (右図はHorse Butte風力発電をNuScaleで調整する例)

変動電力をローカルなネットワークで吸収できないと接続拒否が行われる。再エネ発電地域にSMRを設置し調整することで、システムの強化や接続拒否を避けることができる。⁵⁾

世界のSMRにはどのようなものがあるのか

世界で提案されている主な軽水型のSMRは米国のNuScale, GWH社のBWRX3, ウェスティングハウスのSMR, B&WのmPowerなどがある。その特徴は付録に示す。

米国の最初の炉の許認可申請は、NuScale社とTennessee Valley Authority社によるもので2020年度中に許認可が得られる予定としている。Utah Associated Municipal Power System社はその第1号プラントをアイダホ国立研究所に設置することを考えている。一方、先日NRCはその許認可申請を受理したと報道発表した。

SMRの見通し

西側先進国では国が積極的推進しようとしている国は米国、カナダ、英国程度であり、具体化しているのは米国のNuScaleしかない。米国のSMRの推進団体が軽水冷却型SMRについて、経済性を検討した報告⁶⁾によれば、米国のSMRの市場は、2035年までに保守的に見積もって6GWe、最多シナリオで15GWeになるとしている。右図は小型モジュール炉の予想される配備を示している。

まとめ:

さらなるSMRへの夢

SMRは、大電力会社だけでなく小電力会社や地方自治体でも所有可能

とされ、今後、世界で注目されよう。さらに以下に示す項目が実現すると導入のメリットは飛躍的に高まる。

- ・ 大型炉のような習熟した運転保守が必要ないなら、内陸の地方の自治体や事業者・企業でも導入できる可能性がある。
- ・ 大型航空機のように世界標準規格ができるならば、国際分業の製造も可能である。
- ・ 燃料・材料は軽水炉の経験が利用でき、新たな開発は必ずしも必要ない。
- ・ NRCがNuScale社の審査申請資料を公開しているように、許認可に関する活動が多くの国で共有できると大幅な建設のコストダウンも期待できる。
- ・ 先行するNuScale社はNRCで形式認定を獲得する予定である。経産省の懇談会は同社を招き説明を受けており³⁾、同社は日本の原子力の運転保守や製造技術なども高く評価しており、協力することができれば、日本でも導入が容易になる。

政府や電気事業者に期待したい

日本のメーカーもSMRの研究を行っているが、福島第一原発の事故以来、原子炉の再稼働のための活動が精いっぱい、現在原子炉の新設の議論にまで至っていない。SMRが将来の主流になる可能性もあり、政府や電気事業者が前向きに取り組むことを期待したい。また、これを契機に日本の原子力産業が世界に羽ばたいて欲しいものである。

参考文献

- 1) IAEA(SMR Regulators' Forum Pilot Project Report:Considering the Application of a Graded Approach, Defense-in-Depth and Emergency Planning Zone Size for Small Modular Reactors January 2018)
- 2) Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders OECD 2020 NEA
- 3) 経産省 第7回エネルギー懇談会 NuScaleパワー社説明資料 https://www.enecho.meti.go.jp/committee/studygroup/ene_situation/007/pdf/007_005.pdf
- 4) A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors
- 5) Nuclear Engineering International Integrating nuclear and renewable 2016
- 6) SMR-Start-Economic-Analysis-APPROVED-2017-09-14(cost).pdf

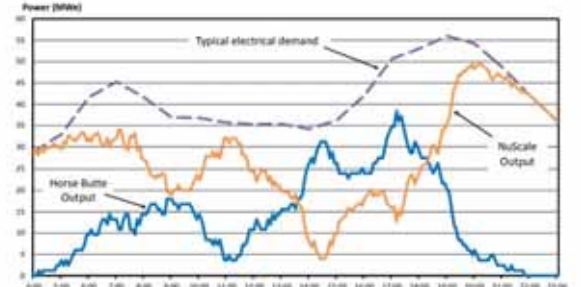
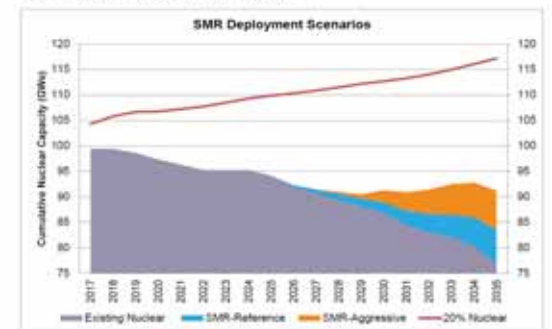


Fig. 1. Example of NuScale module load following to complement for generation from the Horse Butte wind farm on daily

Figure 2 - Projection of SMR Deployments through 2035



付録 主なSMRの特徴

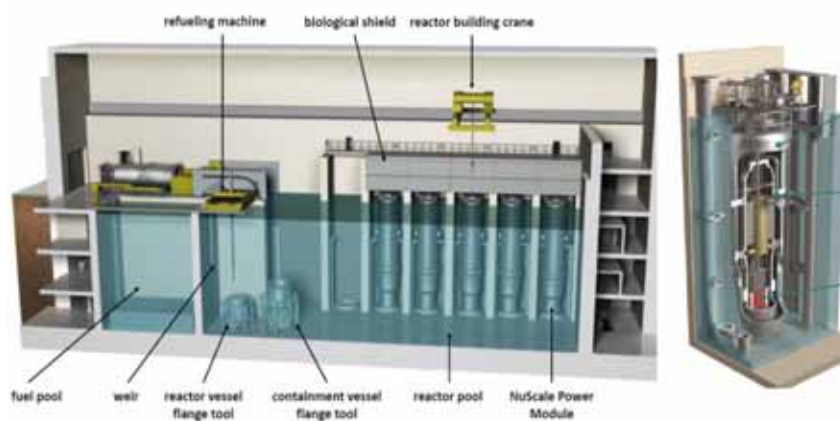
NuScale社 (5万kWe×12)

自然対流で炉心冷却

制御棒は上部から長尺の制御棒を挿入するのが特徴。

小型炉の特長を活かし、万一の事故：初期は格納容器の外側からプール水で、その後は空気冷却で冷却できる。原子炉モジュールを複数設置可能（図は5基設置）原子炉モジュールは鉄道で運搬可能。

NRCは全米の全原子力発電所で要求されているClass 1 E(安全系電源)を必要としないNuScale社のアプローチを承認（2017年12月）³⁾

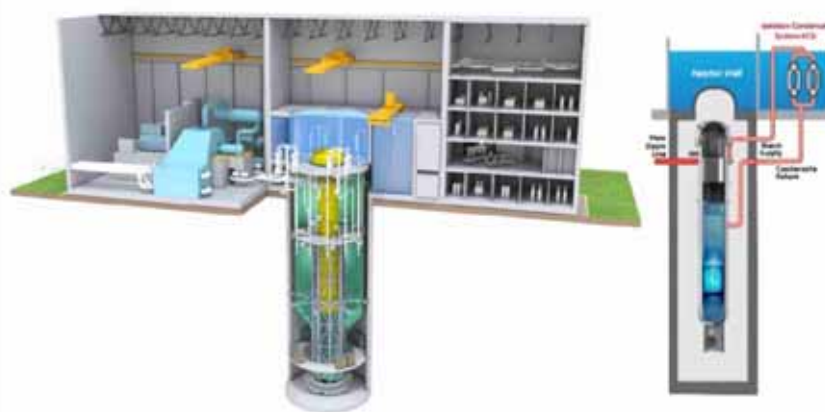


GEH社 (GE日立・ニュークリアエナジー社) BWRX3-300X(30万kWe)

静的安全系を利用する大型BWR ESBWRの技術を適用。

隔離時は格納容器上部にあるプール水で自然循環の冷却系で冷却、万一の時には上部プール水で格納容器を冷却。その操作には動力電源は不要。

NRCの許認可プロセスは2019年12月30日に受け付けられ、トピカルレポートを提出、カナダ原子力委員会によるベンダー審査も2019年5月に開始



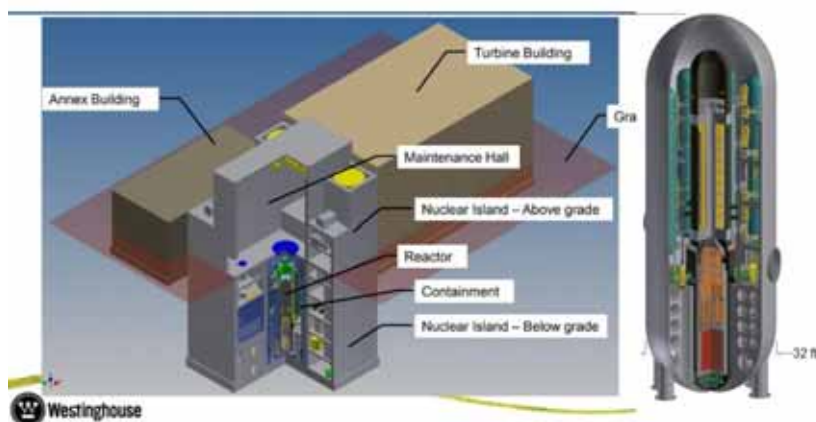
WestinghouseSMR (22.5万kWe)

IRIS設計をWestingが改良。

原子炉容器に2つのフランジを設け、燃料取り換えを容易、冷却ポンプは下部に配置。

初期プラントの見通しはなく、英国に期待している。

炉心、SG等を一体にした原子炉を直径10mの格納容器内に収納する。



mPowerB&W (18万kWe)

WHとほとんどの設計は同じだが、冷却ポンプは上部に配置。

WHやNuclerと異なり大きなドライ格納容器を配置、B&Wはパートナーを探している段階

上記コメントは主として

Small Modular Reactors "The Real Nuclear Renaissance?" Institute of Physics 2016 より
詳しいSMRの安全設計の説明は Canadian Nuclear Safety Commission R550.1 Survey of Design and Regulatory Requirements for New Small を参照されたい

