SMR 開発の展望

東京工業大学 小原 徹

近年小型モジュラー炉 (SMR) の開発が活発に行われている。小型炉の研究はすでに長い歴史があり、様々な炉型に対して研究が行われてきた。最近の開発の特徴は、十分確立された技術をもとにして早期に市場投入を図ろうとしている点などが挙げられる。様々な工学分野では新たな技術革新がもたらされており、また原子力利用を取り巻く環境も大きく変わってきている。新たな技術をうまく取り込み、社会のニーズに応えることが SMR 実現の鍵となると思われる。

KEYWORDS: SMR, Small Modular Reactor, Light Water Reactor, Fast Reactor, Gas Cooled Reactor, Molten Salt Reactor, Innovation, Reactor Physics

I. はじめに

近年小型モジュラー炉 (SMR) に関心が集まっている。一般に動力炉は小型になると発電単価が高くなるため、発電コストを下げるために原子炉を大型化し一基あたりの出力を大きくすることがこれまで行われてきた。一方で小型の動力炉は、建設時の初期資本が小さくてすみ投資リスクを小さくできる、受動的な安全性能の高い原子炉を設計しやすい、送電コストが高くなる遠隔地での利用に適する、地域の熱供給といった地域のニーズに合わせたエネルギー供給が可能といった利点を持っている。小型動力炉の高コストの問題を解決するための方法として SMR という概念が考案された。SMR の概念は、原子炉の設計を規格化して型式認可をとり、同じ設計の原子炉を工場で多数製造し、さらに建設サイトでの工程は出来るだけ少なくすることで、量産効果により製造・建設コストをできるだけ小さくしようとするものである。さらに、受動的な安全性能を出来るだけ生かし、シンプルなデザインとすることでコストの低減をはかることが行われる。SMR の概念自体は以前から存在したが、最近の動向の特徴として、海外のベンチャー企業が独自の SMR 設計概念を提示し、ライセンスを取得した上で市場投入しビジネスとして成功させようとしていることがあげられる。これらの開発ではすでに十分に確立された技術を用いて短期間で開発を行い市場投入を図ろうとしている点が特徴と言える。

II. 30 年前の小型炉研究

SMR を含む小型炉の研究は 30 年以上前から行われてきた。1991 年には東京工業大学で International Specialists'

Meeting on Potential of Small Nuclear Reactors for Future Clean and Safe Energy Sources (SR/TIT) が開催されている^{1, 2)}。小型炉に特化した国際会議としては日本国内ではじめてのものであった。会議のプロシーディングス³⁾から当時はどのような議論がなされていたか振り返ってみたい。この約 30 年前の会議のプロシーディングスには様々な小型炉の概念の論文が掲載されている。炉型別にみると、軽水炉では、小型 PWR, 小型 BWR, 動力用 TRIGA 炉の概念が紹介されている (10 件)。高速炉では、10 件の小型高速炉概念に関する論文が掲載されており、冷却材はナトリウム冷却または鉛・ビスマス、燃料は酸化物もしくは窒化物に加えて鉄・ニウム合金による液体金属をピンに封入した燃料による設計例も示されている。ガス冷却炉 (3 件) では、小型ブリズム型高温ガス炉、小型ペブルベッド型高温ガス炉の概念が示されている。さらに、小型炉の利用に関する論文 (7 件) もあり、遠隔地でのエネルギー供給、宇宙、地域熱供給、海洋 (船用、海底)、医療利用が挙げられている。これらの小型炉の設置については、都市の地下に設置する概念も提示されている。また、小型熔融塩炉概念に関する論文 (1 件) も掲載されている。さらに本プロシーディングスには、小型炉の導入の意義や導入計画に関する論文 (10 件) も収録されている。この中には、小型炉のメリットとして、小型であるためシステム全体の把握・理解が容易で安全性評価も容易になる、工場で製造することによって安定した品質が期待できる、機器や部材がすべて小型であるため設計裕度が確実に把握でき不要な裕度が省ける、メンテナンスや点検が容易になる、小型炉を複数同時に運転することで原子炉停止による電力供給の不安定化を回避できる、実験炉、原型炉、実証炉のように段階を踏んで大型化する必要がないので開発ステップを簡素化できる、事故予防的な運転停止の躊躇がなくなる、比較的少人数のチームによる効率的な

Outlook for SMR development : Toru Obara.

設計・製造ができるなどを挙げる一方、タービン等の熱系を小型化するとデメリットが大きいため小型炉とどのように整合させるかといった課題や安全規制が小型炉に対応する必要があるという点も指摘されている。一方でCO₂放出抑制への貢献についての言及は少なく、現在のような脱炭素の大きな動きは予見できていない。

この当時の研究は概念検討の段階の研究であるのに対し、現在は実際の導入を見据えた研究・開発が行われているといえると思う。当然ながら思いつきで炉概念を決めて開発を進めても実を結ぶ可能性は低い。SR/TITの後にも様々な小型炉概念の研究が多角的に行われてきた。これまで行われてきたSMR研究で得られた知見を十分に生かすことが今後のSMR開発成功の鍵と思われる。

Ⅲ. これからの SMR 研究

筆者の専門が炉物理なので、SR/TITで示されている原子炉概念を炉心構造という観点から眺めてみたい。提示されている炉心概念は熔融塩炉を除いて、すべてピンセルを用いた軽水炉・高速炉あるいは被覆燃料粒子を用いた黒鉛減速炉であり、当時すでに実用化されたあるいは実用化に近い段階まで開発された大型炉の炉心構造と大きな違いはない。炉心解析手法については明確に記載されていない論文もあるが、大型炉の設計のために開発された決定論的解析コードを用いていたと見られる。このため用いられていた炉物理手法は基本的に大型炉のものと同じであったといえる。このような状況は約30年経ってもほとんど変わっていないように思われる。近年公表されているSMRの多くはモジュラー化、工場生産と現地での設置、受動安全性能を生かしたシンプルなデザインを強く強調しているものの、その炉心は基本的には大型炉のそれと同じである。これを炉心解析という観点から見るとSMRだからと言って特別な炉物理解析手法が必要という状況にはない。原子炉工学のほかの分野でも同様なことがいえるかもしれない。

しかしSR/TITが開催された後30年間の間、様々な工学分野において技術革新が起こっている。例として挙げれば、最近注目を集めている技術として金属の積層造形技術(Additive Manufacturing, AM)がある。これは言ってみれば金属用3Dプリンターで様々な部材を作成する技術であり、近年その技術は急速に向上し、さまざまな金属でより複雑で大型の部材を安定した性能で作成できるようになってきた⁴⁾。AMを用いると、これまで製造できなかった形状の部材を容易に作成することが可能であり、また一度プログラムができれば何を作っても製造コストは変わらないため、複雑な形状で多種多様な

ものを小數ずつ作る場合でもコストが高くないという利点がある。小型炉では炉心が小さいため中性子の漏れが多くなり、熱炉の場合は装荷燃料の濃縮度を高くする必要があり、また高い燃焼度を期待することは難しくなる。また高速炉の場合は燃料の転換等の効果を期待することが難しくなる。AMを用いることでピンセルや粒子以外の形状の燃料要素やさまざまな形状の炉内構造物が低コストで製造可能となれば、中性子の漏れが少なく除熱性能の良い炉心が実現できる可能性も考えられる。炉心解析の観点から見るとこのような場合、今までに無い全く新しい形状・構造・組成の燃料要素・炉心に対しても、解析が精度よくかつ高速に行えることが必要になってくることになる。炉物理解析も新しい手法が必要になってくるかもしれない、新しい研究開発のニーズが発生する。ここでは、AMを取り上げてみたが、これは最近の技術革新の単なる一例として取り上げたに過ぎず、現在の他の様々な分野の革新的技術がSMR開発に生かせる可能性は十分にあるものと考えられる。

約30年前のSR/TITのころから原子力利用を取り巻く状況は大きく変化した。それは例えば、安全性要求の高度化であり、巨額投資リスクへの警戒であり、世界的な脱炭素化への大きな動きであり、再生可能エネルギーの積極的利用を求める社会である。同時に、この約30年間の間に、さまざまな分野で当時は想像できなかったような新しい技術が開発され実用のもものとなっている。新しい技術をうまく取り込み社会からの要求にこたえられるものが提示できるかどうか今後のSMR実用化の鍵となるものと思われる。

－ 参考文献 －

- 1) 関本博, 「小型炉のポテンシャル専門家会議」, 日本原子力学会誌, Vol. 34, No.2, pp.135-136 (1992).
- 2) 小原徹, 「SR/TIT -会議の概要と運営の裏話」, 炉物理の研究, 第41号, 41項-44項, 日本原子力学会炉物理部会, 1992年3月.
- 3) Hiroshi Sekimoto (Editor), Potential of Small Nuclear Reactors for Future Clean and Safe Energy Sources, Elsevier (1992).
- 4) T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, et al., "Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties," *Progress in Materials Science*, Vol.92, pp. 112-224 (2018).

著者紹介

小原 徹 (おばら・とおる)

東京工業大学科学技術創成研究院先導原子力研究所
(専門分野/関心分野) 原子炉物理学, 革新炉工学, 臨界安全