

シニアネットワーク連絡会セッション

次世代革新炉について語ろう
 —原子力の社会的受容性を改善するゲームチェンジャーになるには—
 Let's talk about next-generation innovative reactors
 - How to be a game changer to improve the social acceptance of nuclear power

(1) 次世代革新炉の種類と開発のポートフォリオ

(1) Types of next generation innovative reactors and portfolio of their development

齋藤 伸三

シニアネットワーク連絡会

1. はじめに

次世代革新炉の開発は、TMI-2 発電所事故を契機とし、特にチェルノブイリ-4 発電所事故以降は安全炉と称し、その開発が提唱されてきた。液体冷却炉では、冷却材の重力移動や自然循環、あるいは、大気自然対流のような基本的な物理法則を安全機能に採用した新しい形式の原子炉すなわち受動的な安全炉への関心が高まった。その結果、世界的に幾つかの受動的な安全設計概念が提唱された。代表的な受動的な安全炉としては、軽水炉であるPIUS、AP-600（現在ではAP-1000）、SBWR等が挙げられ、高温ガス炉ではMRS、HTR-Mなどがある。そして、再び、福島第一原子力発電所事故を受けて、世界的に安全な革新炉開発が叫ばれている。

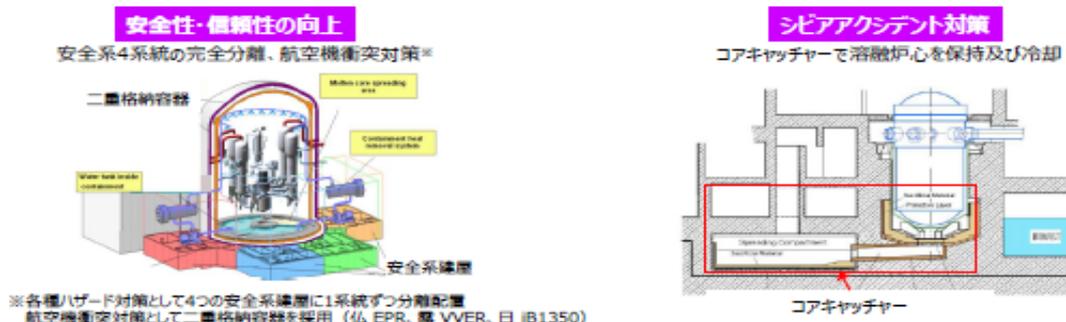
我が国では、現在、革新炉として、革新軽水炉（大型）、小型革新炉、高速炉、高温ガス炉、核融合炉に分類され、特に、政府のGX（グリーントランスフォーメーション）実行会議、その指示を受けた総合エネルギー調査会下の原子力小委員会、革新炉ワーキンググループにおいて、2022 年後半それぞれの現状、開発要素、実現可能性等について精力的に検討された。

ここでは、国際的な情勢も踏まえつつ、上記の革新炉の概要及び現状を述べる。

2. 次世代革新炉の種類

(1) 革新軽水炉（大型）

大型の革新軽水炉は、従来の第3世代炉をベースに、① 地震、津波等の自然災害対策強化 ② 航空機衝突対策を施した二重格納容器 ③ 炉心冷却のための設備、電源の多重性、多様性の強化 ④ 放射性物質放出防止対策 ⑤ 溶融炉心の格納容器内保持（コアキャッチャーの設置）等を具備したものが多く、先行するフランスのEPRの例を第1図に示す。我が国のPWR, BWR メーカーも同様な検討（SRZ-1200, RBWR, iB1350）を行っている。



第1図 EPRにおける安全性・信頼性の向上と重大事故対策

Shinzo Saito
 Senior Network (SNW)

(2) 小型革新炉

小型革新炉の主力は軽水冷却炉であるが、それ以外の高速炉、高温ガス炉、熔融塩炉、マイクロ炉を含めると、代表的なものでも20基を超える。しかし、大半はまだ開発中である。小型革新炉は、出力30万kWe以下の原子炉を言い、いくつかをつなげたモジュラー炉（SMR）も含む。その特徴、狙いは、

- ・安全性の向上：フルパッシブな革新的な安全設計
- ・メンテナンス容易
- ・工場で組み上げる生産方式：品質の維持・向上及び現地工事量の削減
- ・電力需要が小さい地域、グリッドの未発達な地域（途上国等）への普及
- ・熱供給と併用
- ・初期投資が抑えられ、早期の投資回収可能

等々が挙げられている。

ここでは、実際に電気事業者が建設準備を進めている2炉型とマイクロ炉を紹介する。

① BWRX-300（日立-GE, GE-Hitachi）

- ・BWRタイプで、電気出力30万kW
- ・自然循環冷却による事故終息電源・注水設備不要の上、運転員操作なしで7日間冷却可能
- ・圧力容器に隔離弁を直付けすることにより冷却材喪失事故の発生確率を低減
- ・地下埋設によるテロや外的事象に対する耐性強化



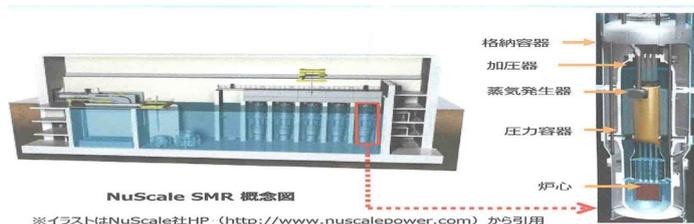
日立多目的蒸気源試験装置

第2図 BWRX-300の特徴

カナダの電力会社 OPG 社が 2028 年運転開始を目指し選定

② VOYGR（米 NuScale 社）

- ・PWRタイプで、1モジュール当り50、77MWeで最大12モジュール
- ・圧力容器内に蒸気発生器を有する一体型炉
- ・自然循環冷却による事故収束



第3図 VOYGR モジュラーの概念図

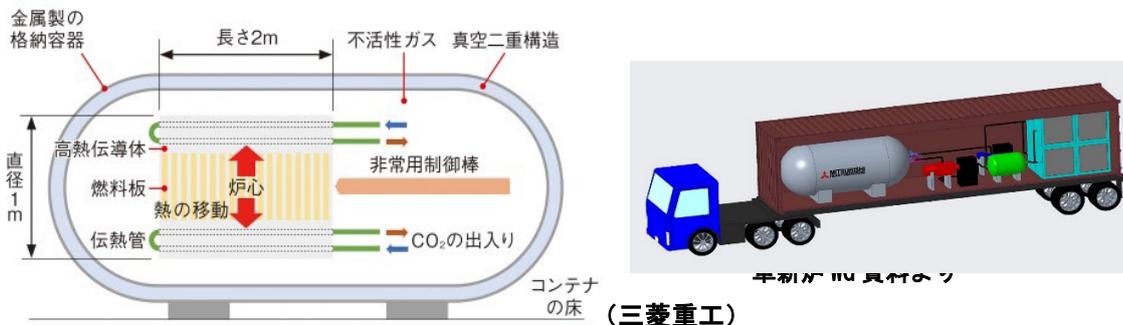
- ・モジュラーとしては、1モジュールの出力を77MWeとしたVOYGR-4（308MWe）、同6（462MWe）、同12（924MWe）を提示している。
- ・日揮、IHIの日本企業も出資して参加している。
- ・INL（アイダホ国立研究所）において初号機運転開始予定

③ マイクロ炉（超小型炉）

米・露などでは古くからその開発に取り組んで来ている。米国では、国防総省が2025年の実用化を目指し軍事オペレーション用に、また、NASAが2030年までに月面探査の電力源として開発中である。ロシアでは、洋上発電用に小型PWRを既に開発し、運用中である。

最近、日本でもアイデアとして全固体原子炉が提案されている。可搬性に優れ離島やへき地、災害時の電源用(500kW) 向きであるとしている。

- ・全固体原子炉で炉心サイズは直径1m×長さ2m (第4図)
- ・炉心の高熱伝導体は円板形状で材料は黒鉛系、原子炉の冷却と減速材の役割を果たす。
- ・燃料版は、蜂の巣状で複数の穴を空け燃料ペレットを収納。燃料は25年間取り替えなし。
- ・格納容器は魔法瓶のような真空二重構造で、内部は不活性ガス



(3) 高速炉

我が国では、原型炉もんじゅの廃止後、2018年12月の関係閣僚会議において、高速炉の本格的利用が期待されるタイミングは21世紀後半のいずれかのタイミングとなろうから21世紀半ばの適切なタイミングで技術的成熟度、ファイナンス、運転経験等の観点から、その後現実的なスケールの高速炉が運転されることを期待するとされた。開発の進め方としては、当面5年程度は、これまでに培った技術、人材を最大限に活用し、民間による多様な技術開発を促進するとしている。国の支援(NEXIP)を受け、三菱重工、日立—GE等が常陽、もんじゅと異なるコンセプトを提案している。

① 小型ナトリウム冷却金属燃料高速炉(MCR-200) 三菱重工、三菱FBRシステム

- ・金属燃料を粒子型とし受動停止による安全性向上、ナノ粒子をナトリウム冷却材に混ぜることで、ナトリウムの化学的活性を抑制
- ・二次系ループをモジュール型に増やすことにより出力増加が可能

② 小型ナトリウム冷却金属燃料高速炉(PRISM) 日立-GE

- ・小型モジュール高速炉
- ・金属燃料による固有安全性、静的機器による受動安全

設計概念は、米国のVTR, Sodium炉に採用

③ 軽水冷却高速炉 日立-GE

- ・MOX燃料棒を稠密に配した四角格子燃料を既設のBWR/ABWRに装荷し、プルトニウムを集中的に経済効率良く燃焼

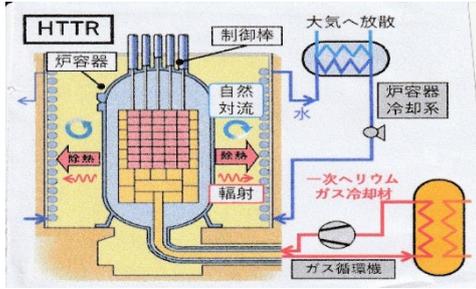
(4) 高温ガス炉

高温ガス炉の特徴として

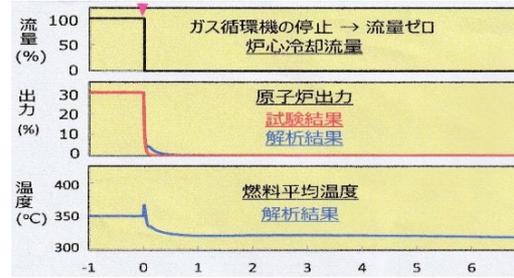
- ・安全性が極めて高く、重大事故対策が不要
- ・出力密度が低く、炉心の熱容量が大きいため炉心の温度変化は緩慢
- ・原子炉容器外への輻射伝熱により崩壊熱は冷却される。(第5図)
- ・冷却材流量喪失+電源喪失事故に対しても、非常用冷却設備は不要。(第6図)

また、極めて高い原子炉出口温度が得られるので、発電のみならず多方面に利用可能であり、多段カスケード式に熱を利用すれば、総合熱利用率70~80%も可能

原子炉出口ヘリウム温度950℃を達成しているHTTRでは、水素製造試験の準備を進めている。また、HTTRでは英国、ポーランドから技術供与が求められ、我が国のメーカーを始め、欧米各国で発電と水素製造に供する高温ガス炉システムが提案されている。



第5図 輻射伝熱による炉心冷却方式
(いずれも高温工学試験研究炉 (HTTR) より)

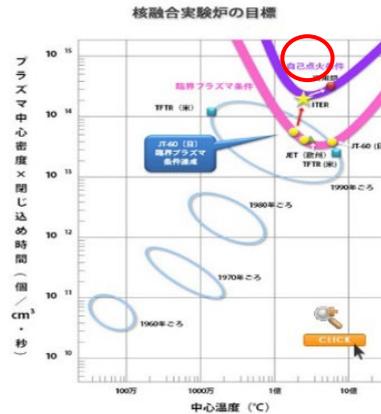


第6図 冷却材流量喪失実験結果

(5) 核融合炉

核融合反応により持続的にエネルギーを取り出し、発電に利用出来るとすればトカマク型であるとされ、長年の国際協力で進められている熱核融合実験装置 ITER は建設途上にある。ITER により、達成、実証すべき課題等は多々ある。

- ・ 自己点火条件の達成 (第7図)
- ・ 長時間燃焼 (~1000 秒) の実証
- ・ 大型・高磁界の超伝導コイル、遠隔保守技術とその適用が可能な炉構造機器の実証
- ・ プラズマ対向機器実証
- ・ 電流駆動装置加熱・実証
- ・ トリチウムの安全管理・回収
- ・ エネルギー取り出し方法の確立



第7図 自己点火条件の達成

3. 次世代革新炉開発のポートフォリオ

革新炉の開発においては、斬新かつ実用化に直結するアイデア、コンセプトは歓迎されるべきであるが、新型炉の開発は、一般的には、実験炉 (試験炉) の建設・運転を通じて、その炉型の実現性・有用性を見極め、原型炉で発電等に利用する上での安全性・信頼性を確認する。その上で実証炉により実用化に向けた経済性を見通しを得て実用化へと進む。

革新炉 (大型) は世界的にも建設・運転が進んでいる既存軽水炉技術の延長線上にあり、最も成熟度が高い。小型軽水炉も軽水炉の延長線上にあるが、経済性も含め初号機建設について不確実性がある。ナトリウム冷却高速炉は、我が国では、酸化物燃料、ループ型の経験はあるが、金属燃料、タンク型は未経験であり、研究開発が必要である。高温ガス炉は、世界最先端の HTTR の経験があり、水素製造の実績を積み、実証炉に挑戦する段階である。核融合炉は、ITER において 2035 年に核融合運転開始を予定されているが、掲げている目標がどの程度達成されるか結果が待たれる。

	2020	2030	2040	2050	
革新軽水炉 (商用初号機)	基本設計	詳細設計	製造・建設	運転	
小型革新炉 (実証炉)	概念設計	基本設計	詳細設計	製造・建設	運転
高速炉 (実証炉)	概念設計	基本設計	詳細設計	建設・試験	運転
高温ガス炉 (実証炉)	基本設計	詳細設計	製作・建設	運転	
核融合炉 (原型炉)	概念設計	工学設計		原型炉移行判断 建設?	

第8図 革新炉の建設・運転ロードマップ (原子力小委員会資料中、「導入に向けた技術ロードマップ」より、炉の建設・運転に係る項のみ抽出)