

小型高速炉 4S と高速炉技術

4S Small Fast Reactor and Fast Reactor Technologies

大田 裕之 福家 賢

■ OTA Hiroyuki ■ FUKUIE Masaru

東芝は、遠隔地のコミュニティや資源開発のエネルギー供給に対応した、燃料交換が不要な小型高速炉“4S (Super-Safe, Small and Simple)”の開発を進めている。現在この概念を実現させるための革新技術である、電磁ポンプ、電磁流量計、及び二重管蒸気発生器の技術実証を当社のナトリウム (Na) ループ試験設備を活用して推進している。これらの技術は、開発中の長寿命制御棒とともに大型高速炉にも適用できる。

Toshiba has been developing a sodium-cooled small fast reactor named 4S (Super-Safe, Small and Simple) suitable for supplying energy to remote communities, mining sites, and so on, which requires no nuclear fuel replacement. We are promoting demonstration tests of innovative technologies related to 4S design such as electromagnetic pumps, electromagnetic flowmeters, and double-wall heat transfer tubes for steam generators, utilizing our sodium test loop facility. These 4S-related technologies and a long-life control rod under development will also be applicable to large-size fast reactors.

1 まえがき

高速増殖炉の開発はウラン資源を有効に使用するために欠くことができない。東芝は、高速増殖炉の開発において、“常陽”と“もんじゅ”の建設、及び実証炉の設計研究に参画してきた。また、これらの経験を基に、遠隔地向けの小型高速炉“4S”を開発している。高速炉では冷却材にNaを用いることから、機器開発にはNa試験が不可欠になる。

ここでは、4Sの概念、当社が所有するNaループ試験設備を活用して開発中の電磁ポンプ、二重管蒸気発生器、及び電磁流量計の機器開発状況と、高速炉開発に向けた技術開発について述べる。

2 4Sの設計

4Sには電気出力10 MWe (熱出力30 MWth) と50 MWe (135 MWth) の出力タイプがあり、以下の特長がある。

- (1) 30年間装荷した燃料を交換することなく運転 (10 MWe の場合)
- (2) 自然現象を活用した安全設計を採用
- (3) 炉内機器に静的機器を適用して信頼性を向上し、メンテナンス量を低減

4Sは、送電網が未発達な遠隔地のコミュニティや鉱山などの電源に適合する。また、海水淡水化用の電源や、オイルサンドからオイル採掘のための蒸気供給源としても期待されている。4Sは、(財)電力中央研究所と開発を進めてきた。10 MWeのプラントは、2007年より米国原子力規制委員会 (NRC) の設計

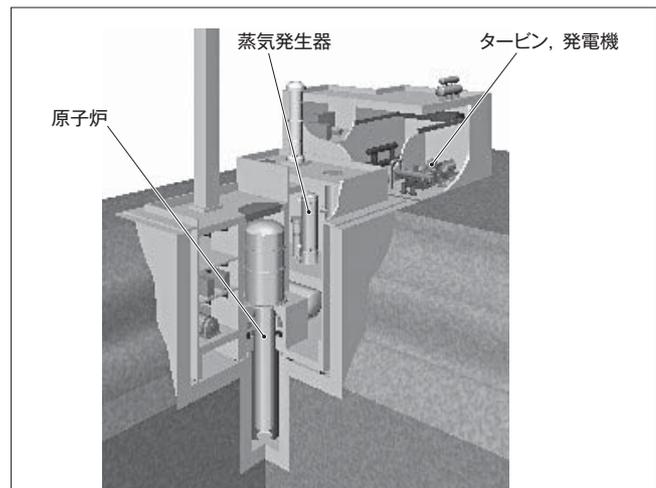
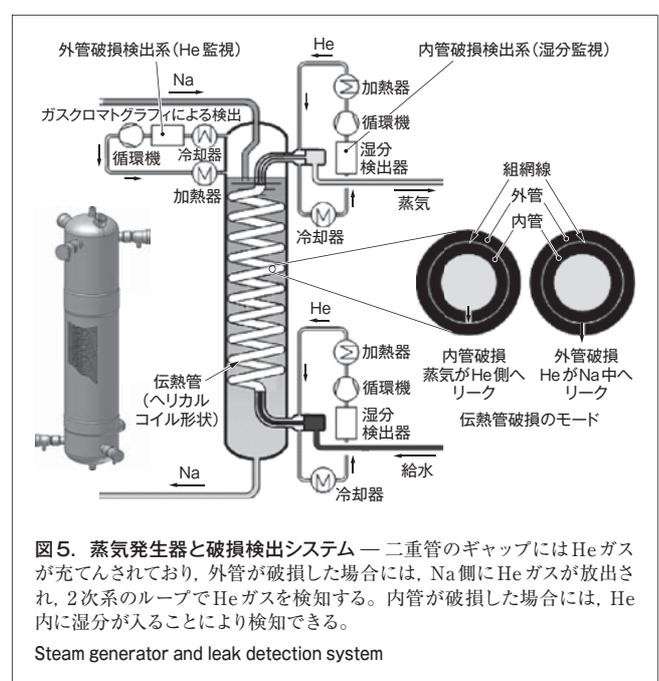
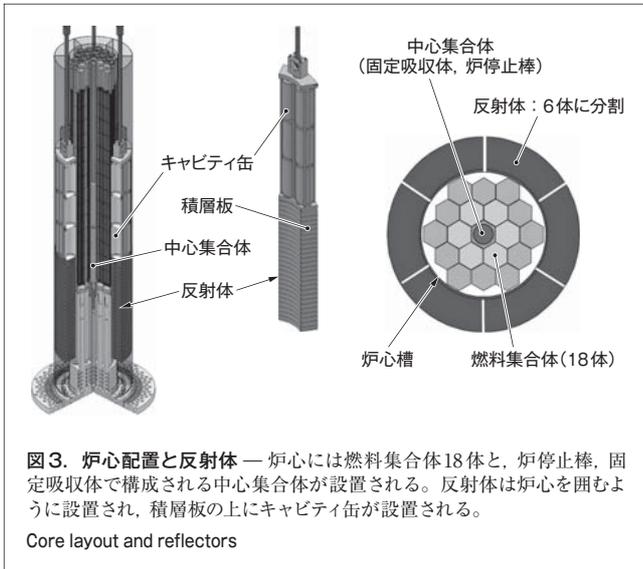
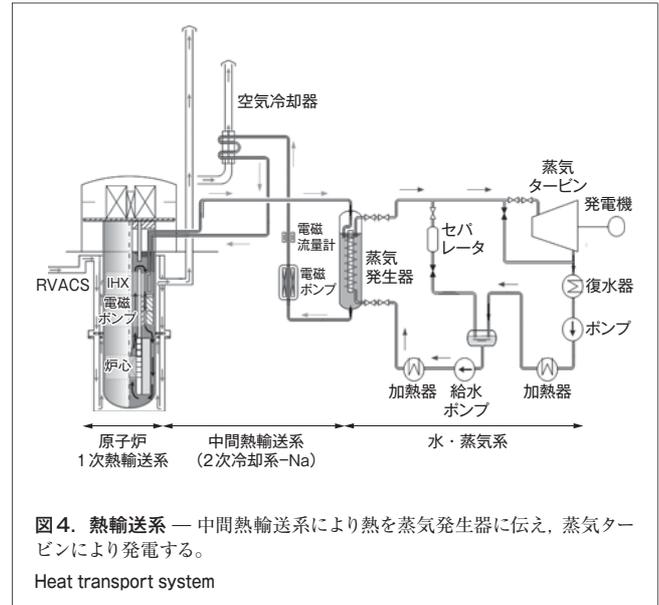
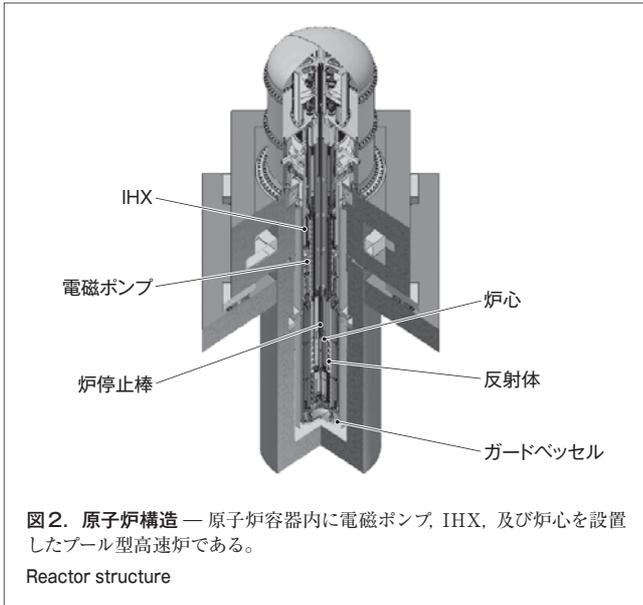


図1. 4Sのプラントレイアウト — 原子炉建物とタービン建物から構成され、原子炉建物は地下に設置される。

Layout of 4S facility

承認 (DA) に向けた事前申請を開始し、2008年8月には公開会議形式のフェーズ1を終了して現在テクニカルレポートをNRCに提出するフェーズ2を実施している。2012年にはDAを申請する予定である。

出力10MWeの4Sのプラントレイアウトを図1に示す。原子炉建屋は地下に設置しており、免震構造を採用している。原子炉構造(図2)は、原子炉容器内に1次主循環ポンプ(電磁ポンプ)、中間熱交換器(IHX)、及び炉心を設置したプール型高速炉である。炉心は金属燃料炉心を採用し、環状反射体を微速度で上昇させて反応度を制御する⁽¹⁾。1次主循環ポン



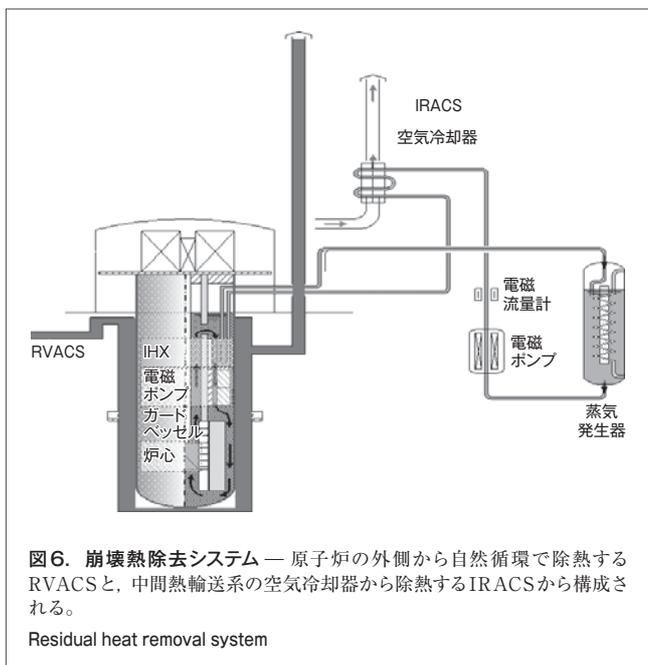
は浸漬型電磁ポンプであり、2基直列に設置されている。
炉心配置と反射体を図3に示す。炉心燃料は濃縮度20%以下の金属ウラン-10%ジルコニウム2元合金であり、炉心には燃料集合体18体と、炉停止棒、固定吸収体で構成される中心集合体が設置されている。反射体は6体に分割され、炉心を囲んで設置されており、反射体部は積層板でその上部にキャビティ缶が設置されている。キャビティ缶により中性子の漏えいを大きくすることで、反射体の反応度を増大させ制御性を向上させている。

熱輸送系を図4に示す。2次冷却系は1ループであり、IHXから蒸気発生器に熱を輸送して蒸気を発生させ、蒸気タービンを用いて発電する。

蒸気発生器は組網線入り二重管のヘリカルコイル型を採用している。二重管には伝熱管破損検出機能があり、水とNa

の反応を防止している。蒸気発生器のリーク検出装置を図5に示す。二重管の組網線層にはヘリウム (He) ガスが充てんされており、外管が破損した場合には、Na側にHeガスが放出され、2次系のループでHeガスを検知する。内管が破損した場合には、He内に湿分が入ることにより検知できる。

崩壊熱除去系を図6に示す。崩壊熱除去系は動的機器がなく、外気とNaの自然対流による熱交換で除熱するシステムで、原子炉のガードベッセル外側から除熱するRVACS (Reactor Vessel Auxiliary Cooling System) と2次冷却系の空気冷却器から除熱するIRACS (Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System) から構成される。これらのうちいずれか一つ



が作動することで崩壊熱を除去できる除熱容量を持っている。

3 高速炉技術

3.1 検証試験

4Sは実証済みの機器を用いることを基本としているが、4Sの概念を実現するためいくつかの革新技術を採用している。革新技術を実証するために必要な試験を表1に示す。

臨界実験⁽²⁾では、4Sの反射体制御方式金属燃料炉心の設計手法を確認した。燃料集合体の圧損特性は水流動試験⁽³⁾で、また、反射体の微小駆動機構はスケール試験⁽⁴⁾で確認した。更に、RVACSにおけるガードベッセルと空気間の熱伝達特性を伝熱試験⁽⁵⁾によって確認した。

当社は、2008年にNaループ試験設備(図7)を完成し、高速炉機器の開発に活用している。最高使用温度は600℃で、

表1. 4S設計に関係する試験
Demonstration tests of technologies related to 4S design

設計対象	検証項目	必要な試験	現状
長尺小径炉心	反射体制御金属燃料炉心の核設計手法	臨界実験	完了
反射体制御炉心	燃料集合体の圧力損失特性	流動試験	完了
反射体	反射体微小駆動機構の動作	駆動装置試験	完了
RVACS	ガードベッセル-空気間の伝熱特性	RVACS伝熱特性試験	完了
電磁ポンプ	構造健全性 運転特性	電磁ポンプのNa試験	実施中
二重管蒸気発生器	構造健全性 伝熱特性 破損検知システムの動作	Na試験 伝熱管破損 検知試験	実施中



Na流量は12 m³/minまでの試験がこの設備で可能である。

3.2 電磁ポンプ

当社は、経済産業省の革新的実用原子力技術開発費補助事業「GNEPの中・小型炉へ適合する大口径高温電磁ポンプとパッシブなフローコスト補償電源の開発研究」で、10 MWe 4S用の実寸大の電磁ポンプを製作し、試験を実施している。当社は過去に、流量160 m³/minの電磁ポンプを製作しNa試験を行っているが、4S用の電磁ポンプは、流路構成上原子炉容器の内壁近傍に設置する必要があることから、内径が2.8mと大きく、高さ対直径比の小さなポンプである。図8に示す電磁ポンプのフルスケール試験体⁽⁶⁾を用いた試験によってこの大口径ポンプの製作性などを確認するとともに、設計定格である流量10.6 m³/min、揚程50 kPaが達成できていることを確認した。

3.3 二重管蒸気発生器

当社は、経済産業省の革新的実用原子力技術開発費補助事業「GNEPの中・小型炉に適合する高信頼性ヘリカル二重



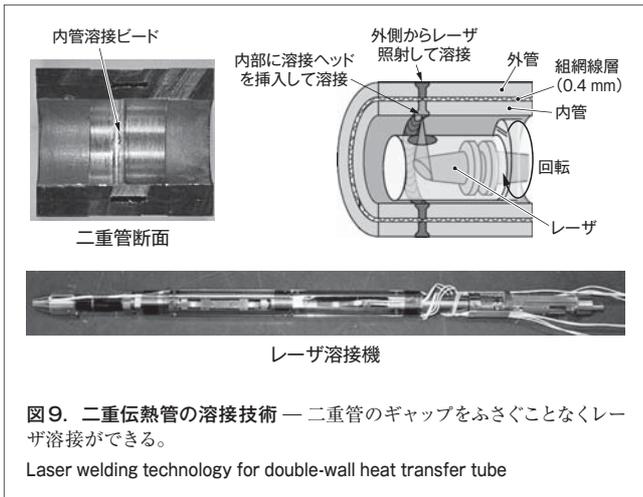


図9. 二重伝熱管の溶接技術 — 二重管のギャップをふさぐことなくレーザー溶接ができる。
Laser welding technology for double-wall heat transfer tube

伝熱管蒸気発生器の研究開発」で、高速炉における水とNaの反応を防止するため、二重管蒸気発生器を開発している。組網線入り二重管は、組網線層内部に充てんされたHeガスにより内外管の破損を検出できる(図5)。当社は、内管と外管の0.4 mmの組網線層をふさぐことなく溶接するレーザー技術を開発し、それを用いて長尺二重管を製作することが可能になった。レーザー溶接機とその溶接適用例を図9に示す。

また、渦電流探傷法により、従来対応できなかった二重管外管を内管内側から検査する方法を開発した。これにより、外側の表面の直径1 mmで20%肉厚深さの欠陥を検出することが可能になった。

3.4 電磁流量計

高温・高放射線影響下で使用でき、電磁ポンプの環状流路の流量を測定するため、新型の電磁流量計を開発している。図10は、文部科学省の受託研究「流量拡張性に優れた苛酷環境に適用する電磁流量計に関する研究開発」で開発を進めている4Sの環状流路に適合する装置である。

3.5 水素化ハフニウム制御棒

文部科学省の受託事業「水素化物中性子吸収材を用いた革新的高速炉炉心の実用化研究開発」で、従来のボロンカー

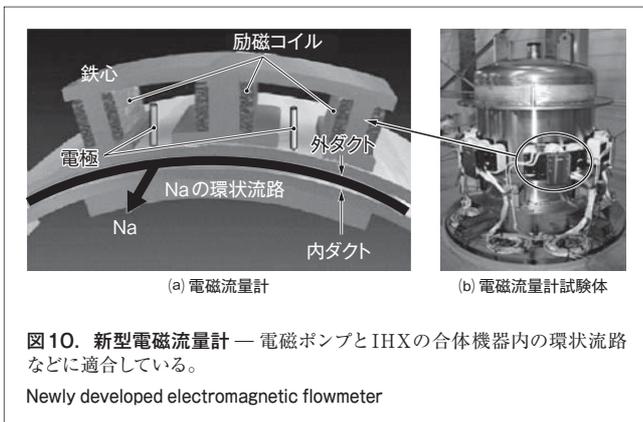


図10. 新型電磁流量計 — 電磁ポンプとIHXの合体機器内の環状流路などに適合している。
Newly developed electromagnetic flowmeter

バイトに替わり水素化ハフニウム (HfH_x) を用いた長寿命制御棒を開発している。熱中性子での吸収断面積が大きいハフニウム (Hf) を高速炉で有効な吸収材にするため、中性子減速材である水素 (H) を吸蔵させた HfH_2 を用いて従来の2倍の長寿命化を目指している。HfからのH解離防止のため、被覆管とペレットのギャップにNaを充てんしたNaボンドピンとして低温化することを検討している⁽⁷⁾。

4 あとがき

当社は、日本の高速炉開発に初期段階から参画し、その経験を生かして、小型高速炉4Sの開発を進めている。また、4Sの炉概念実現のため、革新技術である電磁ポンプ、二重管蒸気発生器、及び電磁流量計を開発している。これらの技術は大型高速増殖炉にも適用が可能であり、また長寿命制御棒とともに大型高速炉用の開発にも貢献できる。

文献

- (1) Tsuboi, Y., et al. "Development of the 4S and related technologies (1) Plant system overview and current status". ICAPP9. Tokyo, 2009-05. ANS, 2009, paper 9214.
- (2) Ueda, N., et al. "Development of the 4S and related technologies (7) Summary of the FCA XXIII Experiment Analysis Towards Evaluation of prediction accuracies for the 4S core characteristic". ICAPP9. Tokyo, 2009-05. ANS, 2009, paper 9493.
- (3) Koga, T., et al. "Development of an Advanced Fuel Subassembly for Non-Refueling Core". 2005 ANS Winter Meeting. Washington D.C., 2005-11. ANS, 2005.
- (4) NRC. "4S reactor first pre-application review meeting with NRC". ADAMS: ML072950025. <<http://wba.nrc.gov:8080/ves/>>, (accessed 2010-11-19).
- (5) Nishi, Y.; Kinoshita, I. "Applicability of reactor vessel auxiliary cooling systems for FBRs (Effect of air duct pressure loss on heat removal characteristics)". Proc. of International Sessions -The 73rd JSME Spring Annual Meeting. Nihon Univ., JPN, 1996-04. JSME, 1996.
- (6) Oyamatsu, Y., et al. "Design validation of the 4S high temperature electromagnetic pump by one pole segment test equipment". FR09. Kyoto, 2009-12. IAEA, 2009, paper FR091080.
- (7) Ariyoshi M., et al. "Study on an innovate Fast reactor utilizing a hydride Neutron Absorber development of Sodium bonded type hafnium hydride control rod". ICAPP10. San Diego, CA, 2010-06. ANS, 2010, paper 10232.



大田 裕之 OTA Hiroyuki

電力システム社 原子力事業部 原子力開発設計部長。
新型炉の開発に従事。日本原子力学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



福家 賢 FUKUIE Masaru

電力システム社 原子力事業部 原子力技術部グループ長。
新型炉プラントの建設プロジェクトの取りまとめ業務に従事。
日本原子力学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.