

高速炉及び先端エネルギー技術

Fast Reactor and Other Advanced Energy Technologies

小林 正彦 尾崎 章 佐藤 潔和

■ KOBAYASHI Masahiko

■ OZAKI Akira

■ SATO Kiyokazu

東芝は、“常陽”や“もんじゅ”をはじめ、実証炉や実用炉の研究開発に至るまで、高速炉の開発に継続して取り組んできた。2007年度から始動した日本の「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」(FaCT) や、米国で公募研究が開始された「国際原子力エネルギーパートナーシップ」(GNEP) など、高速炉の開発に関する国内外の新規プロジェクトにも積極的に参画するため、新たに社内ナトリウムループ試験装置を建設し、これらプロジェクトの課題検証に活用していく計画である。

更に、核融合、加速器、超電導応用製品、及び水素製造設備など先端エネルギー技術の開発にも注力しており、これらを含めて、次世代の原子力技術の実現に貢献していく。

Toshiba has been making continuous efforts in the development of fast reactors, from the Joyo and Monju projects to commercial plants. We are now actively participating in current development programs such as the Fast Reactor Cycle Technology Development (FaCT) project in Japan and the Global Nuclear Energy Partnership (GNEP) project in the United States. As a part of these promotional activities, we are constructing a new sodium test loop to contribute to the research and development efforts in these projects.

In addition, we are working on the commercialization of advanced energy technologies such as nuclear fusion, accelerator systems, applied superconducting systems, and hydrogen production facilities to contribute to the next generation of nuclear technology.

1 まえがき

「原子力立国計画」や「国際原子力エネルギーパートナーシップ」(GNEP: Global Nuclear Energy Partnership) 構想など、国内外で高速炉サイクル開発を加速する機運が高まるなか、東芝は、これまで高速実験炉“常陽”及び高速増殖原型炉“もんじゅ”での機器製造、建設・保守経験、及び実証炉や実用炉の開発で培ってきた技術を、高速炉サイクルの実用化に向けて発展させるよう、積極的な取組みを続けている。

更に当社は、核融合、加速器、超電導応用製品、及び水素製造設備など、先端エネルギー技術の実用化にも取り組んでいる。

核融合の分野では、国際熱核融合実験炉 (ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor) の建設地がカダラッシュ (仏) に決定し、そのサテライト実験装置として独立行政法人 日本原子力研究開発機構 (JAEA) の JT-60U を改造 (JT-60SA) することが決まった。当社は、この活動に初期段階から参画しており、機器の設計・製造を通じて、2010年代の運転開始に貢献していきたい。また、当社は、超電導技術の一般産業応用として、超電導磁石エネルギー貯蔵装置 (SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage) を利用した瞬時電圧低下 (瞬低) 補償装置を開発しており、その商用1号機が2007年に運転を開始した。

ここでは、これら技術開発に関する当社の最近の取組みに

ついて述べる。なお、高速炉サイクルのうち、次世代原子燃料サイクル技術については、この特集のp.23-27を参照されたい。

2 高速炉

JAEAが、高速増殖原型炉“もんじゅ”の運転再開に向けて進めているナトリウム (Na) 漏えい対策工事において、当社は、ドレン系の改良など主要部分を担当してきた。2007年2月に主要担当工事を完了し、改造部分の試運転及び官庁検査も8月末で無事終了した。今後も、本格起動に向けて、引き続き全社を挙げて取り組んでいく。

もんじゅに続く高速炉の開発として、国内では、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」(FaCT: Fast Reactor Cycle Technology Development) が2007年度から始動した。一方、米国では、原子力の利用拡大と核拡散防止の両立を目的としたGNEPが2007年度から本格始動し、米国エネルギー省主導で、先進リサイクル炉及び再処理技術の開発に関する公募研究が開始された。当社は、これまで培った高速炉のプラント設計技術や革新機器設計技術などを活用して、これら国内外の開発プロジェクトにも積極的に取り組んでいる。

また、当社は、高速炉開発の一環として、固有の安全性を持つ10~50 MWe級の小型Na冷却高速炉 4S (Super-Safe, Small & Simple, 図1) の開発を進めている。米国アラスカ州

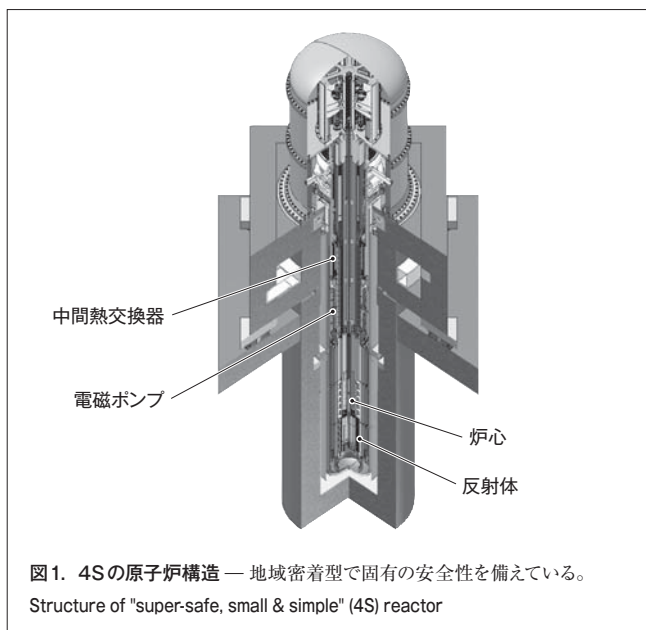


図1. 4Sの原子炉構造 — 地域密着型で固有の安全性を備えている。
Structure of "super-safe, small & simple" (4S) reactor

などの遠隔地域の電源や、オイルサンドなどの資源開発のエネルギー源として適用することを目指している。30年もの間燃料交換が不要な核不拡散型原子炉を特長としており、GNEPで提唱されている中小型炉構想にも適合するものである。現在、米国原子力規制委員会（NRC）に審査を要請しており、今後2年程度で事前審査を終了し、その後本審査に移行し、2010年代に市場投入を図る計画である。

FaCTに採用が計画されている革新技術の一つに1次系簡素化のための合体機器の開発がある。当社が開発を進めている革新機器の一つである電磁ポンプは、回転機構がなく振動が極めて小さいことから、例えば、1次系簡素化のための合体機器に適用した場合には、高い信頼性が得られる。更に、電磁ポンプの軸長さを利用して環状流路に新型の電磁流量計を設置することで、Na流量のより精度の高い計測が可能である。

革新技術の技術課題には、前記の課題に加えて冷却系2ループ化、原子炉容器のコンパクト化、及び蒸気発生器の開発など、今後Na中での試験が必須となるものが多く含まれている。また、GNEPの先進リサイクル炉や4Sに関する技術課題の検証のためにも、実際の冷却材であるNaを用いた試験・評価が重要である。そのために当社は、新たにNaループ試験設備を建設しており、その構成を図2に示す。大型の試験タンクを備え、Naの流量 $1\text{ m}^3/\text{min}$ 、温度 $600\text{ }^\circ\text{C}$ までの試験が可能であるとともに、保有Na量、熱交換器容量などは、 $10\sim 20\text{ m}^3/\text{min}$ の機器試験への拡張を考慮している。これは、国内メーカーが所有する設備としては最大級であり、表1に例示するような革新技術に対応した実流試験が可能である。

当社は、革新機器の開発やNaループ試験設備の積極的な活用により、国内外での高速炉開発プロジェクトに貢献するとともに、技術力強化に努めていく。

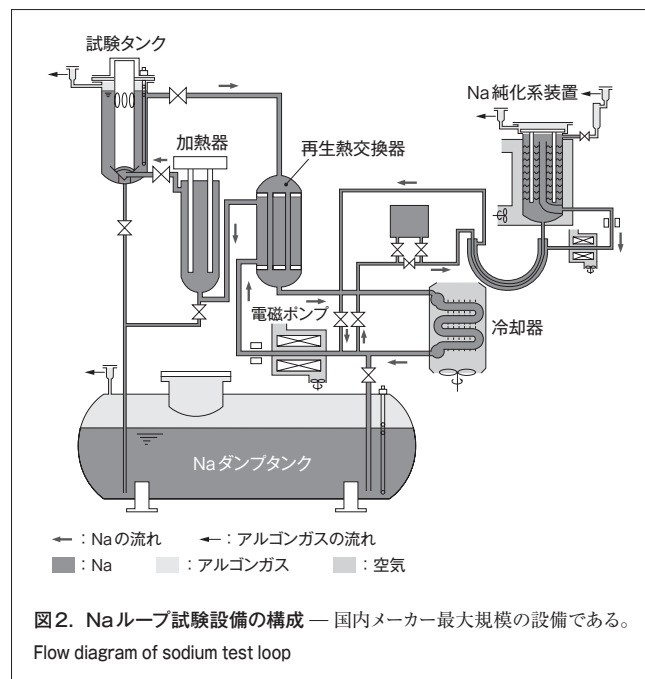


図2. Naループ試験設備の構成 — 国内メーカー最大規模の設備である。
Flow diagram of sodium test loop

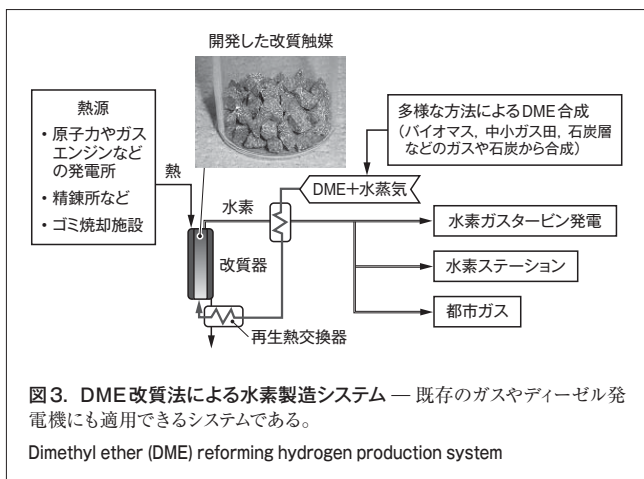
表1. Naループ試験設備を使用した開発試験項目
Test items using sodium test loop

革新技術	試験項目
機器組み込み簡素化冷却系システム	ポンプ特性及び機能健全性確認試験
	ポンプ停止時の流量減少特性確認試験
	組み込み機器のNaシール性能試験
二重伝熱管蒸気発生器	外管破損の検出性能試験
炉内検査装置	Na中目視検査装置の性能試験
マニピュレータ式燃料交換機	燃料交換機の動作性能試験
ナトリウム配管	高流速Na場の構造材料のエロージョン試験
一体型コールドトラップ	コールドトラップの熱過渡試験
原子炉上部プレナム	ガス巻き込み防止構造の機能確認試験
原子炉上部構造	サーマルスライビング試験
燃料集合体	長時間耐久性確認試験
	燃料ピン変形時の伝熱流動試験
反射体システム	挿入性確認試験

3 原子力による水素製造

当社は、二酸化炭素を排出しない原子炉を熱源とした水素製造法を開発しており、種々の原子炉の温度に応じて、ジメチルエーテル（DME：Dimethyl Ether）改質法⁽¹⁾、高温水蒸気電解法⁽²⁾、及び熱化学IS（Iodine（ヨウ素）- Sulfur（硫黄））法⁽³⁾の3種類の製造法について、工学的実証を進めている。

DME改質法は、DMEを原料にして、軽水炉の約 $250\sim 300\text{ }^\circ\text{C}$ の熱により水素を製造する方法である。DMEの改質は比較的低温で行われるため、熱源には既存のガスタービンやディーゼル発電機の排ガスなども利用でき、エネルギーの有効利用にも貢献することができる（図3）。当社は高性能触媒とDME改質器を開発し、実用化されているメタン改質水素ス



ーション (30 Nm³/h 級) に比肩する製造能力を達成した。2007年度、都市ガスエンジン火力発電所に装置を組み込み、排ガスの熱により水素を製造し、実用化に向けた検証を行う計画である。

高温水蒸気電解法と熱化学IS法は、高速炉や高温ガス炉からの500～900℃の熱を利用して水素を製造する方法である。前者については、イットリア安定化ジルコニア製の電解質を用いた円筒形状の電解セルを15本束ねたマルチセルを開発し、800℃で130 Nℓ/hの水素製造を達成した。後者については、水素製造効率を向上させるプロセスの開発を進め、水の電気分解と同等以上の効率を実現できる見通しが得られた。

これらにより得られた水素は、燃料電池、水素ガスタービンによる発電、及び電気-水素変換による電力貯蔵などへの適用を計画している。

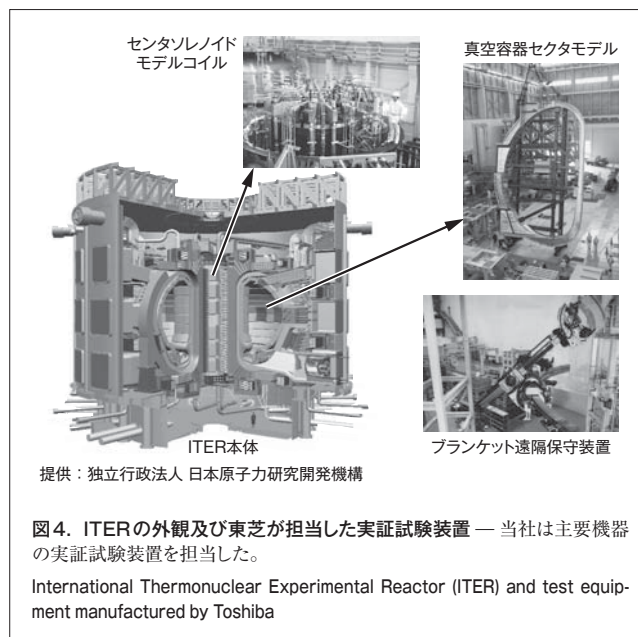
当社は、低環境負荷の水素を基盤とする社会に向けて、今後とも原子力による水素製造技術の実用化に取り組んでいく。

4 核融合

核融合装置は、水素など軽い元素の原子核どうしの融合反応時に発生するエネルギーを利用する装置である。当社は早くから開発に参加し、JAEAのJT-60U装置や大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 核融合科学研究所の大型ヘリカル装置など国内外の装置の製作及び、国際協力が進められているITERの開発に貢献してきた。

当社は、超電導・極低温技術、高耐熱・高強度材料技術、プラズマ解析を含む解析評価技術などを駆使して、核融合装置本体、磁場コイル、プラズマ加熱装置、及び炉内機器の遠隔保守装置の開発において、先導的役割を果たしてきた。

ITERの工学実証のための研究開発では、日本が分担する真空容器、センタソレノイドモデルコイル、及びブランケット遠隔保守装置の試作において、当社は主要機器を担当した(図4)。薄板二重壁構造容器用の狭開先TIG (Tungsten Inert Gas)



自動溶接装置、大型Nb₃Sn (ニオブスズ) 超電導コイルの巻線、熱処理、及び導体突合せ接合の技術、及びビークル方式保守装置など独自技術を導入して研究開発を成功させ、ITER 工学設計活動に貢献した。今後とも、重電や原子力の分野で培われた経験をもとに、ITERやJT-60U改造 (JT-60SA) の本体、超電導コイル、遠隔保守装置、及び関連機器などの製造や、システムの取りまとめに、当社の総合力を結集して積極的に参画していくと同時に、それらを実現するための自社技術開発を進めていく。

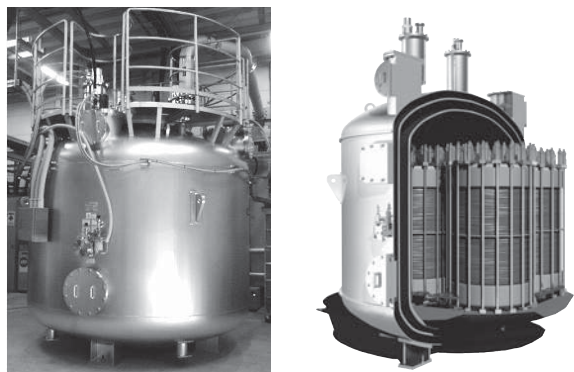
5 超電導磁石エネルギー貯蔵装置 (SMES)

当社は、SMESを用いた瞬低補償装置の開発を進めている。半導体工場などのハイテク工場では、落雷などによる瞬低や瞬時停電で大きな生産被害を受けるため、瞬低補償装置は必須のものとなっている。

SMESは単機容量が非常に大きく、1台で工場一括の瞬低補償が可能である。更に、SMESにおいて電気エネルギーを貯蔵する超電導マグネット(図5)は、鉛などの重金属をほとんど使用しておらず、地球環境への負荷が少ない。また、化学変化を伴わず、極低温に保持されるため、長寿命である。加えて、消防法などの法規制を受けないため、大きなメンテナンススペースを必要とせず、省スペースというメリットもある。

2003年から国内の大型液晶工場でフィールド試験 (中部電力 (株) との共同研究) を実施し、数十回の瞬低すべてで工場負荷を守り、有効性を実証した。2007年7月には、試験機より大幅な低コスト化と省スペース化を実現した、世界最大容量^(注1)の商用1号機 (単機出力: 10 MVA) が運転を開始している。

(注1) 2007年9月1日現在、瞬低補償用のSMESにおいて (当社調べ)。



(a) クライオスタットの外観

(b) 超電導コイル

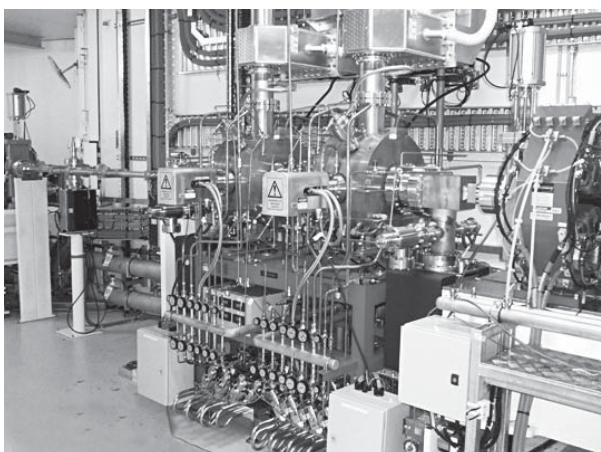
図5. SMES用超電導マグネット — クライオスタット内部に、極低温に冷却された超電導コイルが入っている。

Superconducting magnetic energy storage (SMES)

6 加速器

粒子加速器は基礎科学の実験装置として発展してきたが、近年は医療や一般産業向けの応用も注目されている。当社は超電導機器や高周波機器に強みを持ち、これらの機器を核として、各研究所・大学に加速器を構成する機器単体やシステムを供給してきた。

2003～2006年には23台の超電導三連四極電磁石を量産し、大型ヘリウム冷凍機、8台の大型偏向電磁石、高熱負荷ビームダンプなどと共に、独立行政法人 理化学研究所のRI（放射性同位元素）ビームファクトリーに超伝導RIビーム分離生成装置として納入した。RIビーム生成部の直下流の超電導磁石には、耐放射線絶縁及び耐放射線断熱のためのシートを用い、放射線による100Wレベルの熱負荷変動をキャンセルす



写真提供：Australian Synchrotron Project

図6. 豪州の放射光施設向け高周波(500 MHz)加速空洞 — 東芝は、この施設の心臓部の製作を担当した。

500 MHz radio frequency (RF) cavity for Australian Synchrotron Project

るためのヒータ制御を行うなど、今後の高放射線下の超電導磁石に必要な技術を採用している。

また、大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構と共同で、ビーム加速に有害な高次モードの電磁波を吸収するダンパを備えた、高次モード減衰型高周波加速空洞を開発し、豪州初の放射光施設向け高周波加速システム(2007年運転開始、図6)に採用している。この空洞は、次世代放射光施設向けに小型化及び80 kWクラスの大電力化を行い、エネルギー効率を向上させている。

今後も、核融合炉用材料の開発、放射性廃棄物の短寿命化、新しい素粒子探索、及びがんの治療などを目的とした加速器の建設が計画されており、当社の総合力を結集して技術開発に取り組んでいく。

7 あとがき

将来にわたるエネルギーセキュリティの確保と地球環境の調和のために、高速炉や核融合などの先端エネルギー技術の開発が重要となっている。当社は、これまでの多年にわたる研究開発の蓄積に基づき、これら技術の実用化に向けた開発を更に推進していく。

文 献

- (1) 福島公親, ほか. "原子炉の熱を利用したジメチルエーテル水蒸気改質による水素製造法の開発". 平成16年度火力原子力発電大会論文集. 広島, 2004-10. (社)火力原子力発電技術協会. 2004, p.236-241.
- (2) Yamada, K., et al. "High Temperature Electrolysis for Hydrogen Production using Tubular Electrolysis Cell Assembly Unit". Proceedings of the 2006 AIChE. annual meeting, 275a. San Francisco, 2006-11, AIChE. 2006, p.12-17.
- (3) Fukuie, M.; Maruyama, S., et al. "ANALYTICAL METHOD DEVELOPMENT FOR SULFURIC ACID EVAPORATOR IN IS PROCESS". Proceedings of the 12th International Conference on Nuclear Engineering, ICON12-49353. Arlington, Virginia, 2004-04, ASME. 2004, p.25-20.



小林 正彦 KOBAYASHI Masahiko

電力システム社 原子力事業部 原子力開発設計部長。
もんじゅなどの新型炉の開発設計及び建設業務に従事。
日本原子力学会, 日本機械学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



尾崎 章 OZAKI Akira

電力システム社 原子力事業部 原子力技術部部長。
新型炉, 核融合, 加速器, 超電導システムなどのプロジェクト業務に従事。プラズマ核融合学会, 電気学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



佐藤 潔和 SATO Kiyokazu, D. Eng.

電力システム社 京浜事業所 機器装置部長, 工博。
加速器などの開発機器の設計・製作に従事。日本原子力学会,
日本物理学会, 日本加速器学会, 日本放射光学会会員。
Keihin Product Operations