

最新の原子力技術動向

Trends in Advanced Nuclear Power Technologies

前川 治 塩入 章夫

■ MAEKAWA Osamu

■ SHIOIRI Akio

地球温暖化ガスの排出削減とエネルギー安定供給の観点から各国で原子力発電の建設が計画されるなか、東芝は世界中の顧客のニーズに応えるよう、次期・次世代炉の技術、既設原子力発電プラントの価値向上技術、原子燃料サイクルのフロントエンドからバックエンドに至る技術、及び高速炉技術など、総合的に原子力技術の開発を進めている。更に、超電導、水素製造、核融合炉、及び加速器といった先端エネルギー技術分野の研究にも取り組んでいる。

The construction of numerous nuclear power plants is being planned in various countries with the aim of mitigating global warming and securing stable energy supplies. With this as a background, Toshiba has been contributing to the establishment of the full range of technologies related to nuclear power—including the development of next-generation and future nuclear power plants, maintenance technologies for aging plants, nuclear fuel cycle technologies from front-end to back-end systems, and fast breeder reactor technologies—to meet the requirements of users throughout the world. In addition, we are engaged in the research and development of advanced energy technologies such as superconductivity, hydrogen production by nuclear plants, nuclear fusion reactors, and particle accelerators.

原子力発電プラントメーカーへの期待

地球温暖化の原因となる二酸化炭素(CO₂)の削減やエネルギー安定供給の観点から、原子力発電は有力な解決手段としてその重要性が再認識され、国内はもとより、欧米や新興国においても導入の機運が高まっている。一方、国や地域によって性能仕様や運転条件、環境条件は様々であり、そのため原子力発電プラントメーカーには、プラントの建設や保守・保全だけでなく、燃料供給や使用済燃料及び廃棄物の再処理・処分まで含む総合的な技術力が期待されている。

これらに対する東芝の取組みについて、先端エネルギー技術も含めて以下に述べる。

次期・次世代炉の最新ラインアップ

当社は多様なニーズに応えるため、各出力規模に応じた様々な原子炉を提供できるよう、次期・次世代炉のラインアップの構築を進めている(囲み記事参照)。

大きな特長は、沸騰水型原子炉(BWR: Boiling Water Reactor)と加圧水型原子炉(PWR: Pressurized Water Reactor)をラインアップしていることである。

■次期炉における取組み

改良型BWR(ABWR: Advanced BWR)は、1996年に世界で初めて投入して以来、良好な運転実績を重ねている。中部電力(株)浜岡原子力発電所の5号機では、シールレス改良型制御棒駆動機構や燃料破損ゼロを目指したデブリフィルタなど、経済性、安全性、及び信頼性を高めた新技術を採用し、更に洗練化したABWRとして2005年に運転を開始した。今後建設が計画されるABWRには、触媒を用いた可燃性ガス濃度制御装置や、AFP(Advanced Flow Pattern)及びスナッパ翼の適用により性能を向上させたタービンなどを採用し、経済性、安全性、及び信頼性をよりいっそう高めたABWRを提供する。また、施工手順と3次元CADをリンクさせたシミュレーションにより、効率的な施工手順をあらかじめ調べておく建設工法技術や、機器及び配管などの据付

けに適用する大ブロックモジュール工法も開発済みで、ABWR建設の工期短縮と品質向上を図る。

ウェスチングハウス社(Westinghouse Electric Company)と連携したことにより、当社のラインアップに新しく加わったAP1000は、米国原子力規制委員会(NRC: Nuclear Regulatory Commission)の設計認証を既に得ている原子炉であり、1,200MWe級の電気出力を持つ。最大の特長は動的機器を削除したパッシブ型安全システムにあり、当社の高性能タービンシステムを組み合わせることで安全性と経済性を兼ね備えたプラントとしている。今後、ABWRとAP1000をもって顧客ニーズに応えていく。

■次世代炉における取組み

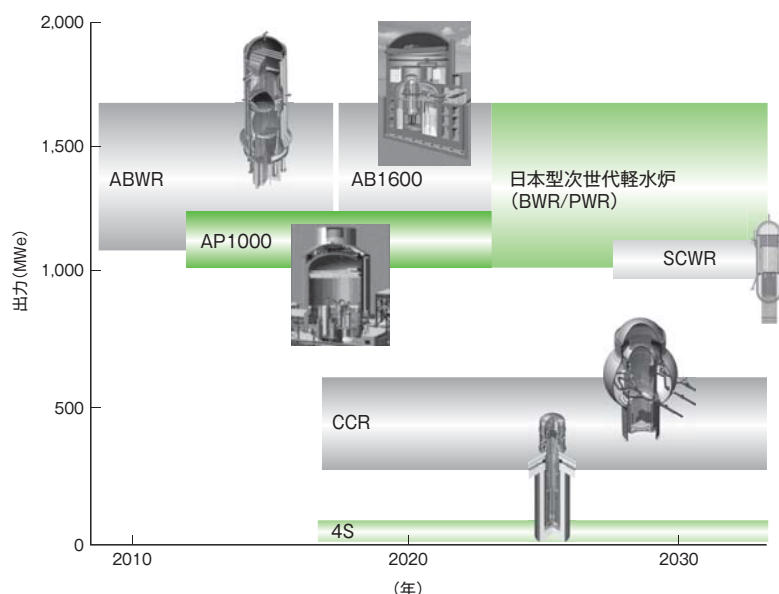
日本型次世代軽水炉のベースとなるABI600は、大出力化による経済性及び、電源や海水冷却系を使用しない静的安全系と準静的バッテリー駆動とを組み合わせたハイブリッド安全系に特長がある。これにより非常用電源などが省略でき、補助設備を削減できる。安全系として熔融燃料を保持するコアキャッ

次期・次世代炉のラインアップ

東芝は、BWRを中心にラインアップ化を進めてきたが、これにウェスチングハウス社が開発したPWRのAP1000を加え、新たなラインアップとしている。2010年代前半までに建設が予定されているプラントでは、洗練化されたABWRと出力1,200 MWe級の中型PWRであるAP1000を提供する。

2010年代後半以降では、安全性、経済性、及び立地条件に応じてAB1600、若しくは中小出力炉としてCCRや4Sを提供する。更に、2020年代から、日本型次世代軽水炉(BWR及びPWR)やSCWRを提供できるように開発を進めている。

様々な選択肢を持つことで多様な顧客ニーズに合った提案ができるよう、ラインアップの強化を図っている。



チャや静的格納容器冷却系 (PCCS) などを採用しているが、これら安全系試験装置は既に開発・製作済みで、今後機能を実証する。

コンパクトPCV (Primary Containment Vessel) 中小型BWR (CCR: Compact Containment Reactor) は、日本原子力発電(株)の委託で開発を進めており、革新技術の採用により簡素化している。具体的には、自然循環冷却方式と上部設置重力落下型の制御棒を採用し、圧力容器と高耐圧格納容器に非常用復水器を組み合わせただけで重大事故などの際にも安全性が維持できるようにしている。現在、CCRの設計検討と同時に上部設置重力落下型の制御棒と非常用復水器の開発を進めている。

超臨界圧水冷却炉 (SCWR: Super-Critical Water cooled Reactor) は、蒸気サイクルの超臨界圧化 (25 MPa) と高温化 (560℃) により、発電効率を35%から44%へ大幅に向上させるとともに、プラントの簡素化及び小型化によりコストを削減し、経済性を飛躍的に高めたことに特長がある。これまで高温と高圧に耐える燃料被覆管及び炉内構造

材を開発し、材料への要求仕様を明らかにした。またオーステナイト系ステンレス鋼やニッケル基合金など候補材の材料試験を行い、要求仕様を満足できる可能性を示した。2006年には日本が将来炉開発の国際協力 (GIF: Generation IV International Forum) に参画することが合意されており、当社もこの国際協力に参加していく。

小型ナトリウム冷却高速炉 (4S: Super-Safe Small & Simple) は、30年間燃料交換を必要としない核不拡散型原子炉であることが特長で、米国の国際原子力エネルギーパートナーシップ (GNEP: Global Nuclear Energy Partnership) 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、NRCに審査を要請しており、2010年代に市場投入する計画である。また、ウェスチングハウス社と協力し、その開発力と許認可対応の豊富な経験を活用して、早期実現を目指している。

電プラントが増加しているが、設備の維持管理及び更新を進めることで60年にわたる長期供用運転が計画されている。そこで当社は、60年長期供用運転を実現しながら、設備稼働率を90%以上、プラント性能向上を5%以上、被ばく線量低減を世界標準レベル以下とすることを目標として、プラントリコンストラクション™を提案している。これら目標を達成するために必要な技術開発への取り組みについて述べる。

■ 検査評価技術

長期供用運転を実現するためには、まずプラント各部の状態を把握する検査評価技術が重要である。

炉内構造物の検査技術として、当社独自の水浸法によるマルチチャンネル型フェーズドアレイ超音波探傷 (UT) を既に開発しているが、各種の水中遠隔検査装置 (ピークル) に搭載して実機を容易に検査できるようにした。また、配管減肉対策として、超音波板厚計測に加え、当社独自のカラーI.I.™ (Image Intensifier) 技術やマルチセンサによる3次元UT検査技術を開発している。こ

既設プラントの価値向上

運転期間が30年以上となる原子力発

れらで取得したデータを総合的に判断し、適切な補修計画を立案する減肉管理システムも併せて構築している。

■保守・保全技術

プラント炉内機器の応力腐食割れ(SCC) 予防保全として、当社独自のレーザピーニング(LP) 技術は、BWRだけでなくPWRにおいても既に適用実績がある。更に、耐水型の小型レーザ発信器の開発により、従来はコンテナ大のサイズだったレーザ発信器を小型化することに成功し、機動性と操作性が向上した(図1)。また、複数台を同時に設置し施工することで工期短縮が可能になった。今後、海外のPWRへの展開も進める。

■プラント性能の向上技術

熱出力増加及びタービン高性能化のための技術開発を進め、プラント性能の向上を図っている。プラント性能向上においては、機器単体の性能向上だけでなく、性能向上によるプラントへの影響を評価することが重要であり、当社は、解析技術の高度化による健全性評価技術の確立を行っている。例えば、音

響共振による蒸気乾燥機損傷事象といった熱出力増加による炉内機器への影響について、音響解析及び構造解析技術により機器の健全性評価を行うなど、プラント性能向上技術と合わせ、プラント全体の健全性確認を行いながら、性能向上を進めている。

■中央制御室の高度化

新検査制度により導入が予定されている長期サイクル運転に向けて、運転情報や定期検査情報などプラント情報の一元的な管理と保全システムの運用が求められている。中央制御室を中心としたプラント全体の新たな機能として、プラント運転を通して集められる膨大な情報を収集管理し、最適に共有化を図ることが必要である。このため、中央制御室を高度化し、ネットワーク型制御盤と情報専用LANの導入により、必要な情報を現場から自動収集できるようにした。更に、中央制御室、事務所などのあらゆる場所で共有できるようにする保全システムや、携帯情報端末、コミュニケーションボードなどの開発も進めている。

■放射性廃棄物処理設備のリコンストラクション

プラントの長期供用化に伴って増加する比較的放射能レベルの高い低レベル放射性廃棄物(L1廃棄物)、プラント停止以降発生する廃棄物、及びプラント廃止措置時に発生するクリアランスレベルを含む廃棄物の処理について検討する必要がある。

これに関して当社は、L1廃棄物処理やクリアランスレベルの検認装置の開発などを実施しており、これらを適用した放射性廃棄物処理設備のリコンストラクションを提案している。今後のプラントの寿命延長やプラント停止後の処理、保管、及び廃止措置時の処理など、プラントの最終処置までを考慮したものである。長期にわたってプラント全体を最適化するという観点から、放射性廃棄物処理設備の高度化を進めている。

原子燃料のフロントエンド及びバックエンド技術

原子燃料サイクルの確立と併せて、濃縮工場から出る劣化ウランを混合酸化物(MOX) 燃料製造の原料に使うため、再転換工場の新規建設が検討されている。これに対し当社は、ウェスチングハウス社の再転換技術と当社の建設技術を組み合わせて検討を進めている。また、燃料ペレットや燃料棒の検査装置を開発することで、フロントエンド技術への取組みを広げている。例えば、独自の画像データ処理方法で外観検査と寸法検査を同時に実施して客観的な数値データを提供できるようにする、燃料ペレット及び燃料棒の画像検査装置を開発済みである。

一方、バックエンド技術への取組みとして、原子力発電プラントや再処理施設などから発生する放射性廃棄物の減容・安定化処理について、超臨界水技術や高機能セメント固化技術を開発している。特に、L1廃棄物埋設処分の安全性を向上させた高機能セメント固化

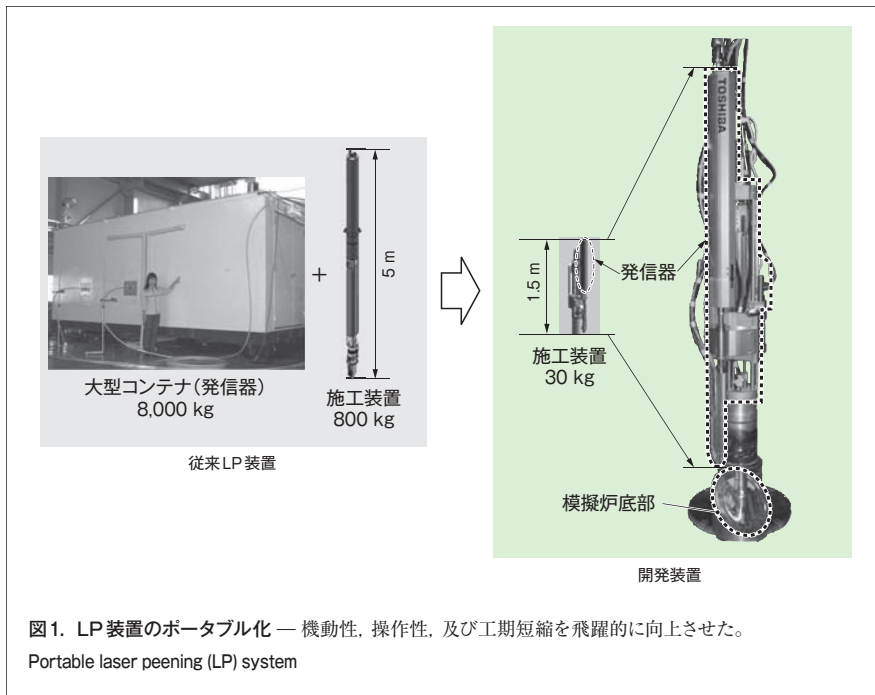


図1. LP装置のポータブル化 — 機動性、操作性、及び工期短縮を飛躍的に向上させた。
Portable laser peening (LP) system

技術は、独自開発の特殊流動化剤を添加したもので、濃縮廃液、廃樹脂、及び焼却灰の直接固化が可能であり、BWRとPWR双方に適用できる。また、廃棄物再利用技術では、使用済燃料の被覆管やチャンネルボックスに使われているジルコニウムを、溶融電解法により回収・再利用する技術の開発を進めている。更に、独自のX線センサであるカラーI.I._{TM}技術を用いて廃棄物収納容器の内容物を識別する検査装置を開発済みであり、バックエンド技術への取組みを広げている。

次世代原子燃料サイクル

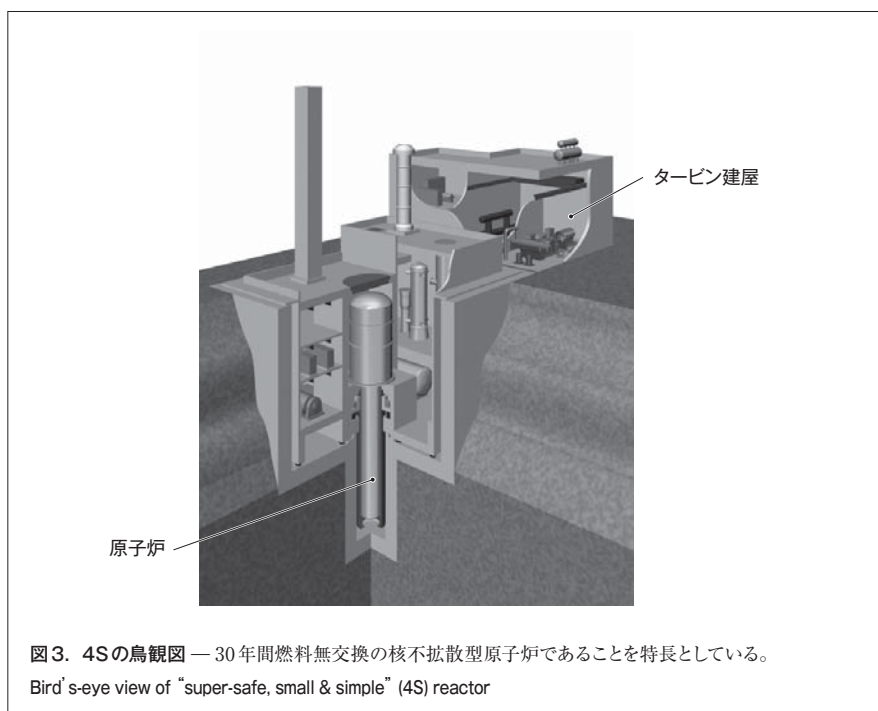
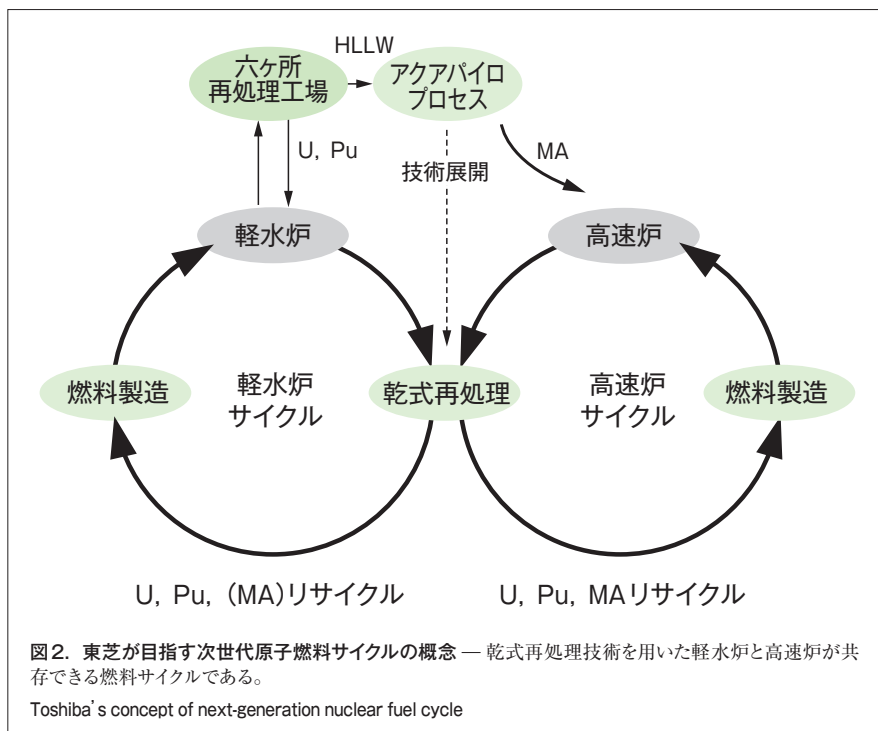
今後の原子力発電プラントは、軽水炉から徐々に高速炉へ移行すると予想され、軽水炉と高速炉が共存する移行期を迎える。当社は、高速炉の導入期から本格的な高速炉時代まで適用できる次世代原子燃料サイクルの実現を目指し、開発を進めている(図2)。高速炉と乾式再処理技術について以下に述べる。

■高速炉

当社は、高速増殖炉(FBR)原型炉“もんじゅ”のナトリウム漏えい対策工事において、ドレン系改良などの主要部分を担当し、2007年8月末で改良部の性能確認を完了した。更に、2007年度から開始されている「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」(FaCT:Fast Reactor Cycle Technology Development)や米国のGNEPなど、国内外の高速炉開発プロジェクトに対しても当社の独自技術を生かして積極的に貢献していく。

また当社は、10～50MWe級の4S(図3)の開発を進めている。現在NRCに事前審査を申請しており、2010年代に市場投入する計画である。

これら国内外プロジェクトの革新機器開発では、ナトリウム中での試験が必須である。当社は、国内メーカーとしては最大級の設備となるナトリウムルー



プ試験設備を新たに建設し、ポンプや蒸気発生器など、高速炉特有の機器の試験を行う予定である。それらにより革新技術の開発が加速するとともに、国内外のプロジェクトへの大きな技術的貢献が期待できると考えている。

■乾式再処理

使用済燃料の再処理で発生する高レベル放射性廃液(HLLW)に含まれる、マイナーアクチニド(MA)と呼ばれる長半減期の放射性核種を、高速炉では燃料として燃焼させることが可能である。そのためMAをウラン(U)やプルトニウ

ム (Pu) とともに回収して燃料とすることで、資源の有効活用とHLLW量の低減が可能になる。

当社は、(財)電力中央研究所や独立行政法人日本原子力研究開発機構などと協力して、20年以上にわたり、次世代再処理システムとして乾式再処理技術の開発を進めてきた。乾式再処理は、現行の再処理プロセスに必要な使用済燃料の溶解、燃料成分の分離・精製・脱硝・回収といった複数工程を単一の工程で処理できるシンプルなシステムであり、Puを単体分離することが原理的に困難なため核拡散抵抗性に優れているなど、多くの特長を持っている。今後も、次世代原子燃料サイクルの中核技術として開発していく。

先端エネルギー技術

当社は、原子炉の熱を利用した水素製造法、核融合炉、超電導応用製品や加速器についても技術開発を進めている。

水素製造では、種々の原子炉(軽水炉、高速炉、高温ガス炉など)の冷却材温度に応じた三つの製造法(ジメチルエーテル改質法、高温水蒸気電解法、及び熱化学法)の開発を進めている。このうちジメチルエーテル改質法では、固体酸と金属系触媒を混合した世界最高レベルの効率を持つ高性能触媒を開発し、実用化されているメタン改質水素ステーションに比肩する水素製造能力を達成した。2007年度中に、火力発電所の排気に試験装置を設置して実用化に向けた検証を開始する予定である。

核融合では、核融合装置本体、磁場コイル、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。特に、国際熱核融合実験炉(ITER: International Thermonuclear Experi-

mental Reactor)の工学実証研究開発において、主要機器である真空容器には薄板二重壁構造容器用の狭間先TIG (Tungsten Inert Gas)自動溶接技術、中心ソレノイドコイルには大型Nb₃Sn(ニオブ3スズ)超伝導コイルの巻線・熱処理や突合せ導体接合技術、及び遠隔保守装置にはピークル方式保守技術など独自技術を導入し、ITER工学設計活動に貢献してきた。今後もプラズマ解析や電磁気解析などを含む解析技術を駆使して、ITERの建設及び大型トカマク装置JT-60Uの改造に取り組んでいく。

超電導応用では、超電導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES)を用いた瞬時電圧低下補償装置を開発した。2003年から試験機での実証試験によりその有効性を確認するとともに、2007年7月に、変換器の合理化で大幅な低コスト化と省スペース化を実現した商用1号機の運転を開始している。この装置は、瞬時電圧低下補償装置としては世界最大容量(単機出力10MVA)である。

加速器では、独立行政法人理化学研究所の放射性同位元素(RI)ビームファクトリーの超電導RIビーム分離生成装置や、オーストラリアの放射光施設向け高周波加速システムを製作した。特に、電子ビームを加速する高周波加速システムにおいて、ビームに影響を与える有害な電磁波を吸収する新方式のダンパ部を、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構との共同研究で開発し、安定なビーム運転に貢献している。また、独立行政法人放射線医学総合研究所の重粒子線加速器では、スキャニング用電磁石とレンジシフトにより、がん治療部の形状に合わせてビーム形状を3次元的に整形し照射する装置を製作した。この装置は、正常細胞の損傷が従来に比べて格段に低く抑えら

れ、ビームの利用効率が向上している。

今後も、超電導技術、高周波技術、及びシステム技術を駆使して技術開発を行うとともに、新製品の開発を進めていく。

総合的な原子力技術の開発に向けて

次期・次世代炉のラインアップを用意するとともに、プラントリコンストラクションTM技術、原子燃料サイクル技術、フロントエンド・バックエンド技術、及び高速炉技術など、原子力全般にわたって技術開発を更に進め、世界トップクラスの原子力発電プラントメーカーとしてあらゆる顧客ニーズに応えていく。

先端エネルギー技術においても、将来にわたるエネルギー供給や原子力以外の分野で引き続き開発を進めていく。

当社は今後も、これらの技術開発への更なる取組みを通して、地球環境と人間社会への貢献を目指していく。



前川 治
MAEKAWA Osamu

電力システム社 原子力技師長。
米国機械学会、日本機械学会、日本原子力学会会員。
Power Systems Co.



塩入 章夫
SHIOIRI Akio

電力システム社 軽水炉技師長。
日本原子力学会、日本機械学会会員。
Power Systems Co.