

福島第一原子力発電所の汚染水処理システムと東芝の取り組み

Development of Radioactive Wastewater Treatment Systems at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and Toshiba's Efforts

有馬 由紀 竹内 努 吉野 晃

■ ARIMA Yuki ■ TAKEUCHI Tsutomu ■ YOSHINO Akira

2011年3月11日の東日本大震災により被災した東京電力(株)福島第一原子力発電所の早期安定化に向けて、震災当初からの大きな課題は、原子炉・燃料プール安定冷却及び汚染水の拡散防止であった。原子炉の安定冷却は、当初は海水やろ過水など外部からの注水に依存していたため、注水した水は原子炉建屋とタービン建屋に滞留していた。

東芝は、滞留水を移送し、浄化処理するシステムを早期に納入することで、処理水を注水用水として再利用する循環注水冷却の実現に寄与してきた。このシステムは現在まで、施設外への溢水(いっすい)もなく安定的に運用されている。

In keeping the condition of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (NPS) of The Tokyo Electric Power Company, Inc. under control, following the serious damage to the NPS as a result of the Great East Japan Earthquake and subsequent tsunami on March 11, 2011, both stable cooling of the reactors and spent fuel pools and control of the radioactive wastewater to prevent release have been crucial issues. The reactor cooling has depended on the injection of water from outside, with seawater used first for approximately one month, after which the supply was changed to filtered water. In both cases, however, the water flowed into the reactor buildings and turbine buildings.

Toshiba contributed to the realization of circulating water injection cooling at the NPS by supplying a radioactive wastewater transferral system and the first purification system in the initial three months, followed by a second purification system, called SARRY™, which provided stable treatment capability. These systems make it possible to reuse injected water by purification for further injection, eliminating the need for additional water from the outside. These systems also decrease wastewater generation in the NPS and minimize the risk of spills into the environment.

1 まえがき

2011年3月11日の東日本大震災から数週間後、福島第一原子力発電所1～3号機の原子炉冷却用に注水した水が原子炉建屋内にとどまらずタービン建屋などに流入しており、外部から水を持ち込む“外部注水”を継続すれば、いずれ建屋や開口部から溢水することが判明した。

タービン建屋の滞留水は、津波による浸水や注水に利用した海水と真水が混合したもので、塩素濃度は14,000 ppmとほぼ海水相当、かつCs-137 (Cs(セシウム)の放射性同位体。以下、Csと略記)の放射能濃度 $3 \times 10^6 \text{ Bq}^{(注1)}/\text{cm}^3$ という水質であった(表1)。また、注水冷却は少なくとも約1年は継続する必要があり、水の総量は25万tと推定された。

米国スリーマイルアイランド原子力発電所2号機の炉心溶融事故での処理対象水が、塩素濃度1,000 ppm及びCs放射能濃度 $1 \times 10^6 \text{ Bq}/\text{cm}^3$ オーダーで、総量が数万tであった。これと比べても、福島第一原子力発電所の滞留水は放射能濃度が同程度であるものの、塩素濃度が高く、処理規模が大きい点で前例のないものであった。

ここでは、滞留水の移送から循環注水冷却までのシステムに適用した技術とそれに向けた東芝の取り組みについて述べる。

(注1) Bq(ベクレル)は、1秒間に1個の原子核が崩壊して出す放射能の量を表す単位。

表1. 処理対象水の概要

Summary of wastewater treated at Fukushima Daiichi site

存在箇所	発生源			たまり水の量 ^(*) (m ³)	Cs放射能濃度 (Bq/cm ³)	性状	備考
	津波	地下水	原子炉注水冷却				
1号機	○	○	○	17,700	1.6×10^5 ^(*)2)	海水を含む	
2号機	○	○	○	25,000	2.8×10^6 ^(*)2)	海水を含む	
3号機	○	○	○	22,000	1.6×10^5 ^(*)2)	海水を含む	
4号機	○	○	—	20,000	2.2×10^1 ^(*)2)	海水を含む	
5号機	○	○	—	300	低レベル	海水を含む	
6号機	○	○	—	13,500	低レベル	海水を含む	
港湾	—	—	—	—	30 ^(*)3) 3号機スクリーン海水(シルトフェンス外側)	海水	5月11日、3号機取水口付近のピット内へ汚染水が流出

*1: 2011年5月16日時点の推定量。出典: 東京電力「福島第一原子力発電所 たまり水の量について(概算量)」^[1]
 *2: タービン建屋地下階から3月24日(1, 3, 4号機)と、3月27日(2号機)に採取。出典: 東京電力「タービン建屋溜まり水分析結果(JAEA)」^[2]
 *3: 5月13日に採取。出典: 東京電力「福島第一原子力発電所取水口付近で採取した海水中に含まれる放射性物質の核種分析の結果について」^[3]

2 1～4号機の汚染水処理システム

2.1 汚染水の移送設備

1～4号機の各タービン建屋地上階には、トラック出入用の大物搬入口が海側に設置されている。津波はこの大物搬入口シャッターを破壊して、タービン建屋の地下を浸水させた。更

に、タービン建屋の地下ケーブルトレンチは海側に向かって敷設され、地盤の低い海側で立坑と呼ばれる地上への開口部を持つため、滞留水の水位が上昇すると、この開口部から施設外に溢水して海洋に流れ出るおそれがあった。

そのため、早急に汚染水を移送する必要があったが、移送用の空き容器が敷地内にはなかった。そこで、既設の集中環境施設（集中RW）エリアにあるプロセス主建屋や高温焼却炉建屋（HTI）などの地下階を防水して貯蔵エリアとすることになった。一方、水の抜出しに使用する水中ポンプは、海水中で1年間連続稼働させる運転実績は乏しく、長期運転によるポンプ故障で交換が必要になる可能性があった。汚染したポンプの交換よりも、投入したまま、新規ポンプを追加投入する作業のほうが作業員の被ばく線量を低くできるため、あらかじめ同じ開口部に複数のポンプを投入できるように投入位置を管理するポンプ投入設備を製作した。ポンプ投入設備は、作業員の被ばくを防止するため、開口部からつり下ろし位置を決めるピースと内部を直視せずにポンプをつり下ろす機能を持たせた。各建屋から集中RWエリアまでの移送はホースで連結し、できるだけ建屋内に敷設することで、万一漏えいしても施設外へ流出するリスクを低減した（図1）。これらの移送システムは、概念検討から、設計、製作、現地工事まで、2週間で完遂した。特に現場はがれきが散乱した状態であり、移送ルートを机上計画することは難しく、設計者も現場に赴いて敷設を行った。

2.2 第1汚染水処理設備

集中RWエリアの地下階は一時貯蔵には有用なエリアであったが、外部から持ち込まれる水の量を低減するには、滞留水を



注水に再利用するための浄化システムが必要であった。そこで、2011年4月上旬には、注水水質目標の塩素濃度1 ppm以下とする汚染水処理設備を設計することになった。

当社は、高線量を取り扱う設備として集中RWエリアから淡水化装置の前段までを取りまとめた（図2）。建屋から施設外への溢水を防止するため、システムの稼働開始は約2か月後とし、運用は少なくとも1年と決められた。短期間のため採用できる材料は限定的であったが、“施設外への漏えい防止”と“作業員と運転員の被ばく抑制”をコンセプトにこのシステムを設計した。

まず、施設外への漏えい防止のため、①漏れない、②漏れを検知して停止させる、③漏れても施設外へ漏えいしない、という三つの機能を持たせた。①では、漏れない構造として、配管は溶接構造、あるいはフランジの場合はトルク管理を行うこととした。②では、漏れを検知できる構造として、貯蔵容量が大きいタンク類は底部に漏えいパンと検知器を設置するほか、放射線耐性を持つITV (Industrial Television) カメラを設置して屋外から漏えいを監視し、隔離可能としている。③では、漏れても施設外に流出しないように、設備を既設の建屋内に設置した。

次に、被ばく抑制のためには、屋外に設置した遠隔監視操作盤で設備を遠隔操作できる構造とし、弁には短期間で工事可能な電動駆動 (MO) 弁を採用した。MO 弁は供給電源が故障しても開度保持されるため、単一電源故障時も移送を継続できる。また、アクセスが必要な場所には遮へい材を設置した。

更に、システムを安定稼働させるために、滞留水中の津波由来の不純物を吸い込まないように配慮するとともに、Csを除去するゼオライト粒子が油で汚染されないように油水分離装置を設置した。

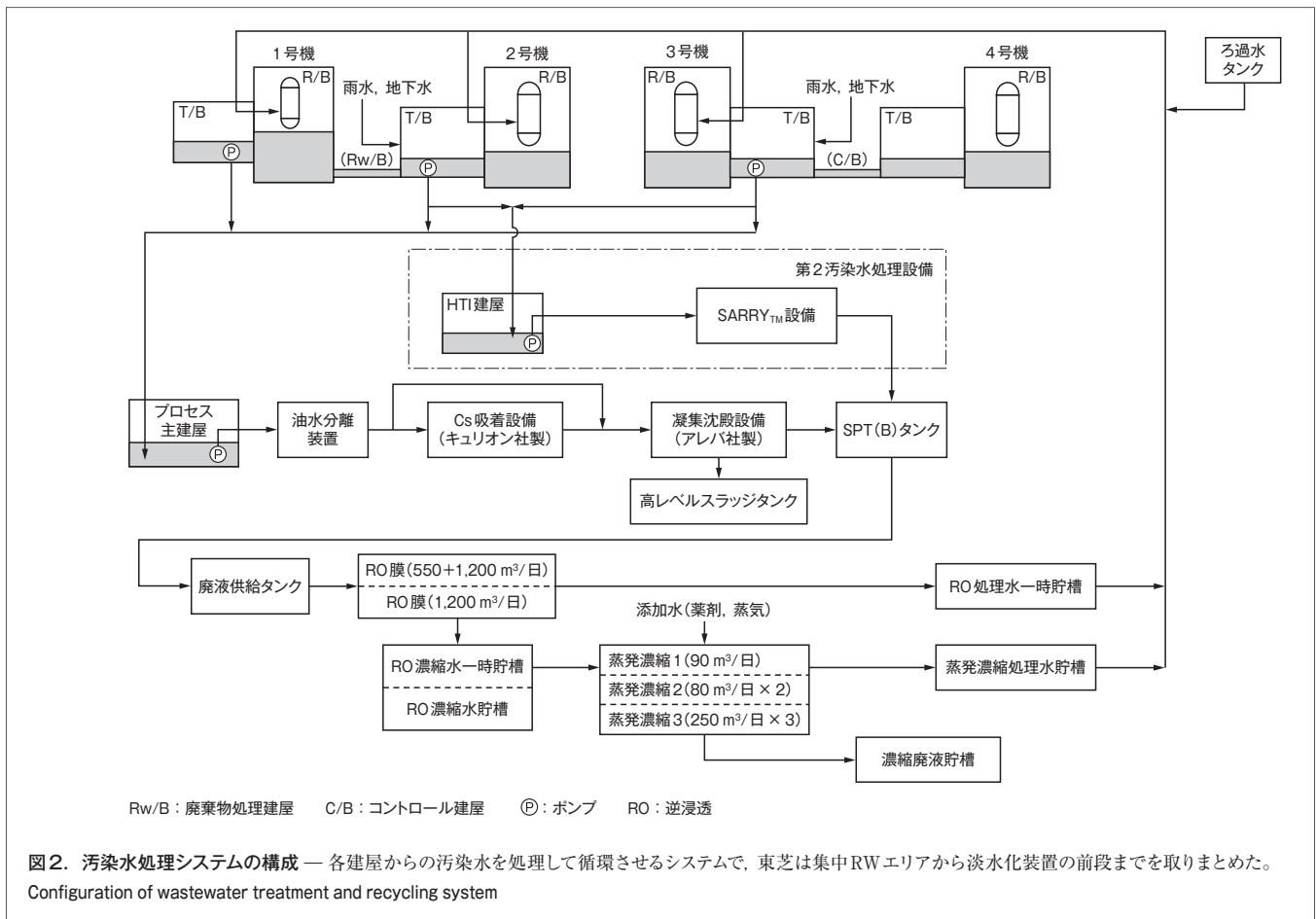
Cs除去装置としては米国のキュリオン社とフランスのアレバ社の装置を組み込んだが、いずれも長期の海水処理運転を考慮したものではなかったため、万一の故障や性能低下に備えて各装置間には中継タンクを設け、流量調整やバイパスするなど処理運転を調整できるものとした。

装置の設置場所や配管ルートは、現場調査により決定した。建屋の1階エリアは津波による浸水で通常状態とは大きく異なるうえ、室内照明も不十分ななかでの現場調査であったため、いくらかの仮定を含めて系統設計を行った。

この設備の機器は同年5月上旬から徐々に現地に到着し、配管長4,000 m、溶接3,000か所、及びケーブル長48,000 mに上った据付工事（図3）から試運転を経て、同年6月17日に運転を開始した。

2.3 第2汚染水処理設備 SARRY™

汚染水処理を早期に実現するため、第1汚染水処理設備は即納品の組合せで対応したが、長期にわたる処理運転では、



安定的に性能を発揮し操作性に優れた、放射性廃棄物を管理できる設備が必須になる。そこで当社は、新たにCs除去装置の検討を開始した。除去後のCsを放射性廃棄物として管理するには固体廃棄物形状が望ましく、吸着塔を採用したシ

ステムとすることにした。

こうしたなか、米国での実績に基づいた米国ショーグループの提案を受け、新たに汚染水処理設備SARRY™ (Simplified Active Water Retrieve and Recovery System)を設計した。機器はショーグループ、(株)IHI、及び当社で分担して製作した。

吸着塔の構造は、吸着したCsの崩壊熱に耐えるとともに、水の放射線分解で発生する水素をバント除去し、取扱い時の被ばく線量を低減させるため、周辺に遮へい機能を持たせた(図4)。使用済みの吸着塔は立入り制限を設けるものの、特別な監視は不要である。

また、吸着塔を多段化し、吸着剤を有効利用して廃棄物発生量を低減するため、1塔目を交換した後は2塔目を1塔目として通水するように通水順を変更できる構成を採用した(図5)。

吸着メディアは種々あるものの中から、海水条件でも優れた吸着性能を持つ米国UOP社のIE-96とIE-911を選択した。吸着性能カーブは流れのある系の吸着モデルを選定し、実規模サイズの試験により検証した。検証後のモデルでシミュレーションした吸着性能カーブと実機データは、図6に示すようによく一致している。これにより、吸着塔交換やそれに伴う滞留水の移送停止作業も、事前計画が可能になった。

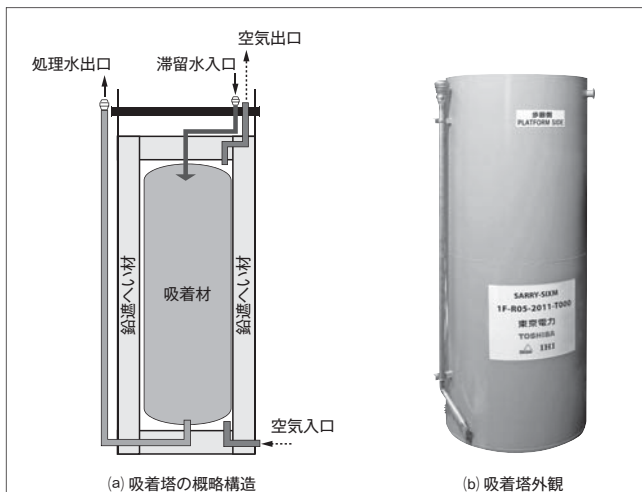


図4. SARRY™ 吸着塔の概要 — 吸着塔は、吸着したCsの崩壊熱に耐え、水の放射線分解で発生する水素をベント除去し、被ばく線量を低減するための鉛遮へい材を周辺に設けた。
Outline of SARRY™ vessel for second wastewater treatment system

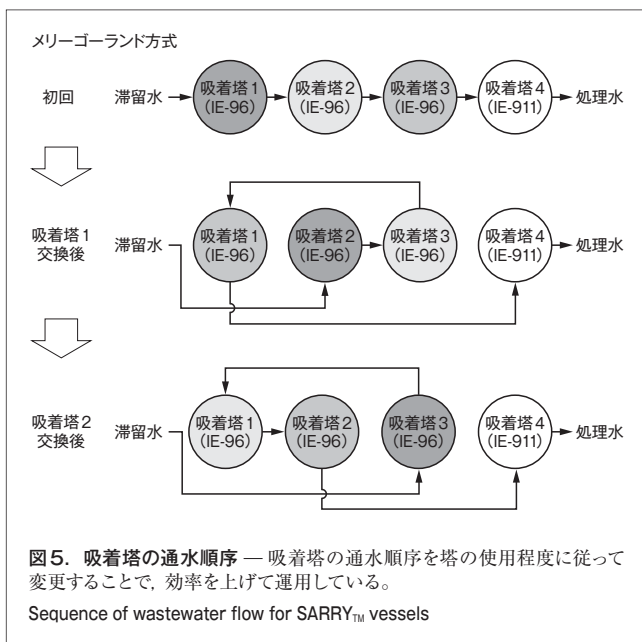


図5. 吸着塔の通水順序 — 吸着塔の通水順序を塔の使用程度に従って変更することで、効率を上げて運用している。
Sequence of wastewater flow for SARRY™ vessels

(注2) 除去処理前の放射能濃度を処理後の放射能濃度で割ったもので、値が大きいほど不純物が除去されることを示す。

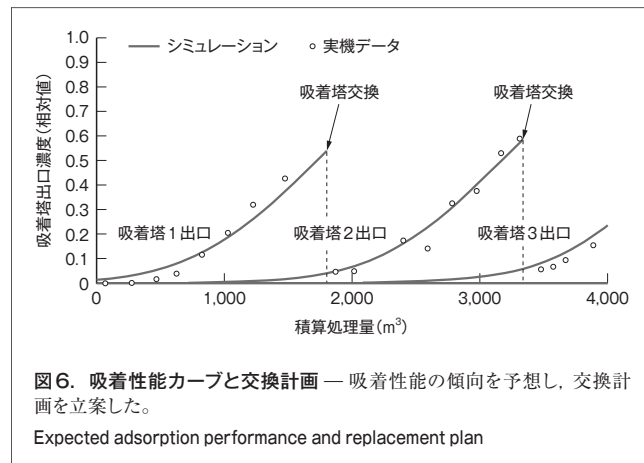


図6. 吸着性能カーブと交換計画 — 吸着性能の傾向を予想し、交換計画を立案した。
Expected adsorption performance and replacement plan

吸着性能を示す除染係数(DF:Decontamination Factor)^(注2)は、Csで 10^6 オーダーであることを確認した。この性能は第1汚染水処理設備のキュリオン社とアレバ社の装置を合わせたものと同等である。また交換頻度は、設置当初は3日で1本程度と安定していた。放射能濃度は注水により徐々に希釈されるため、吸着メディア入口の海水濃度やCs濃度が低下すると吸着寿命は変化する。したがって、これらの諸条件を踏まえて適宜評価し、吸着塔の交換時期を提案している。現在では、吸着塔の交換周期は3～4週間に延びており、廃樹脂の発生量も大幅に減少している。

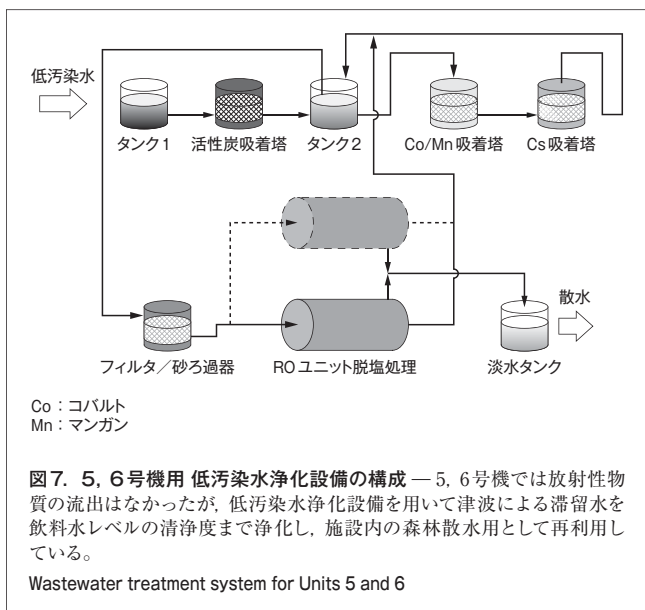
第2汚染水処理設備は2011年4月下旬に検討を開始し、同年5月上旬に実施を決定した後は、装置構造の設計及び妥当性評価を経て、製作、現地据付工事、及び試運転を行い、同年8月18日に運転を開始した。SARRY™の稼働率は90%以上であり、汚染水処理は、この設備を中軸として運用することで、いっそうの安定運転が可能になっている。

このほか当社は、淡水化装置として蒸発濃縮装置も開発して据付調整工事を行った。1～4号機の汚染水処理システムは、現在も運転に供されている。

3 5, 6号機の浄化処理設備

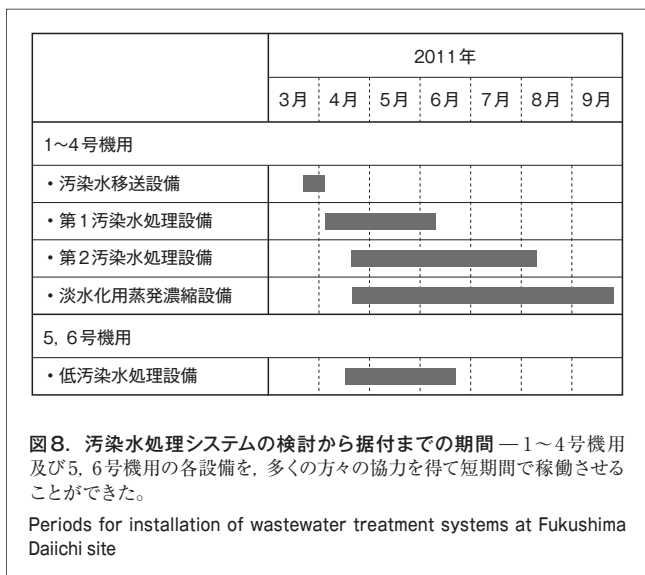
5, 6号機については、外部電源による原子炉冷却システムが復旧したため放射性物質の流出はなかったが、津波による滞留水に大気中に拡散した放射性物質が混入している可能性があり、放射性物質を施設外へ漏らさないため浄化処理することになった。この設備は1～4号機用とは異なり、放射能濃度は極低レベルであったため、飲料水レベルの清浄度まで浄化し、施設内の森林散水用に再利用されている。

低汚染水の浄化処理設備を図7に示す。このシステムは2011年4月から検討を開始し、2か月後の同年6月に運転を開始した。



4 あとがき

福島第一原子力発電所における汚染水処理システムの設計・製作・現地作業は、当社だけでなく、国内外の多くの方々の協力により短期間で実現したものである(図8)。このシステムの稼働により、処理水を循環再利用させることが可能になり、外部からの持込み水を削減することができた。



汚染水処理システムは2012年9月30日現在でも運用を継続しており、RWエリアに移送した汚染水は、Cs放射能濃度が 1×10^5 Bq/cm³、塩素濃度が300 ~ 800 ppmと減少傾向が続いていることを確認している。

当社は、原子炉の冷却注水計画や地下水の流入状況を考慮した処理設備全体の運用計画をシミュレーションし、今後の運転方法や必要になる設備の提案を行うなど、今後も、福島第一原子力発電所のグリーンフィールド化に向けた検討を進めていく。

文献

- (1) 東京電力. “福島第一原子力発電所 たまり水の量について (概算量)”. <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_110518_02-j.pdf>, (参照2012-10-19).
- (2) 東京電力. “タービン建屋溜まり水分析結果 (JAEA)”. <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_110522_04-j.pdf>, (参照2012-10-19).
- (3) 東京電力. “福島第一原子力発電所取水口付近で採取した海水中に含まれる放射性物質の核種分析の結果について (5月13日採取分)”. <<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11051405-j.html>>, (参照2012-10-19).



有馬 由紀 ARIMA Yuki

電力システム社 原子力事業部 原子力化学システム設計部グループ長。原子力発電所の放射性廃棄物処理システムの設計・開発に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



竹内 努 TAKEUCHI Tsutomu

電力システム社 原子力事業部 原子力化学システム設計部グループ長。再処理施設に関わる設計・開発に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



吉野 晃 YOSHINO Akira

電力システム社 原子力事業部 原子力化学システム設計部グループ長。再処理施設に関わる設計・開発に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.