

ABWRの国内外への展開

Domestic and Overseas Development of Advanced Boiling Water Reactors

畠澤 守

■ HATAZAWA Mamoru

澁野 聡志

■ FUCHINO Satoshi

中田 耕太郎

■ NAKADA Kotaro

東芝は長年にわたり改良型沸騰水型原子炉 (ABWR) の開発に携わり、1996年に世界初のABWRを東京電力(株) 柏崎刈羽原子力発電所6号機に納入した。その後も当社の主力製品としてABWRの建設・運転支援を継続しており、現在、電源開発(株) 大間原子力発電所の建設並びに東京電力(株) 東通原子力発電所1号機の設計を進めている。更に今後計画されている発電所向けに東芝型 ABWRの標準化を推進している。

また、海外でのABWRプロジェクトとして、米国サウステキサスプロジェクト3、4号機 (STP-3/4) のEPC (設計、調達、建設) 契約を締結しプロジェクトを遂行するとともに、フィンランドプロジェクトの受注に向け提案活動を進めている。これら当社のABWR世界展開を支えるため、シビアアクシデント (過酷事故) の対策設備や安全設計のための解析技術高度化なども推進している。当社はこれらの活動を通じて地球温暖化防止とエネルギーセキュリティ確保を両立できる原子力発電の世界的なニーズに貢献している。

Since Toshiba delivered the world's first advanced boiling water reactor (ABWR) to The Tokyo Electric Power Company, Inc. in 1996, we have been devoting continuous efforts to the construction and operational support of ABWR systems as major products. We are now promoting the construction of domestic and overseas ABWR systems along with the standardization of ABWRs. We are also engaged in the research and development of core technologies to support further promotion of ABWRs as a concurrent solution to the issues of global warming and energy security for individual countries.

1 まえがき

地球温暖化とエネルギーセキュリティ確保の課題を同時に解決する一つの有力な手段として原子力発電が国際的に検討されるなか、特にABWRはいわゆる第三世代軽水炉の中で唯一豊富な運転・建設実績を持つ炉型として注目を集めている。

また、ABWRは1997年に米国原子力規制委員会 (NRC) における設計認証を取得しているとともに、東芝は2009年、国内メーカーで初めて、NRCによるABWR供給メーカーとしての監査に合格した。当社は、国内各電力会社、並びに世界各国の多様なニーズと規制要求に対応しながら、ABWRを戦略的製品として国内外に提供し展開していくことにしており、その概要を以下に述べる。

2 ABWRの取組み

2.1 国内での取組み

2.1.1 電源開発(株) 大間原子力発電所の建設 電源開発(株) 大間原子力発電所は、2008年5月に着工し、2014年11月の運転開始を目指し建設中である。当社はタービン設備を受注し、現在、本格工事を遂行している。

工事には、建築会社と協力して世界初のタービン・発電機

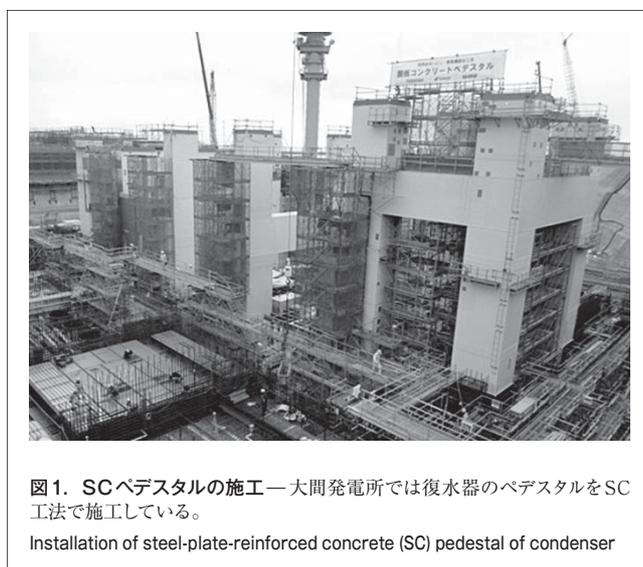


図1. SCペDESTALの施工—大間発電所では復水器のペDESTALをSC工法で施工している。

Installation of steel-plate-reinforced concrete (SC) pedestal of condenser

架台工法 鋼板コンクリートペDESTAL (SCペDESTAL)、及び建築工事との融合を図った世界最大級の機電・建築複合工法 ハイパーマルチモジュールなど、建設期間を短縮する工法を採用している。タービン設備の工事状況を図1及び図2に、ハイパーマルチモジュールの製作状況を図3に示す。

また、当社が開発した6DCAD_{TM}を大間原子力発電所の建



図2. 復水器(下部)の据付け—大間発電所で復水器(下部)を据え付けているようすである。

Installation of lower part of condenser



(a) 製作のようす

(b) CADイメージ

図3. ハイパーマルチモジュールの製作—大間発電所では鉄骨、配管、機器などを大型モジュール化して据え付けている。

Installation of hyper module

設から適用し、機器及び配管からケーブルトレイ、ダクト、電線管に至るまで細部にわたるコンポーネントを反映した3次元(3D)CADデータに、工事物量、工程、及び人員をリンクさせて、建設計画段階から現地工事をシミュレーションしている(図4)。これにより、モジュール範囲を拡大して、現地工事の物量を低減するとともに、並行作業範囲を拡大することが可能になった。

建設計画だけでなく、現地工事管理で6DCAD™を活用することで、工事進捗に合わせた効率的かつタイムリーな工程調整を行うことが可能になり、常に最新の実績(アズビルト)データがデータベース化されることになる。

このように、プラント建設計画段階から実際の現地工事管理まで、当社が長年培った建設経験で蓄積した各種設計情報のデータベース(DB)を連携させた、DBエンジニアリングの構築を行った。このエンジニアリングプロセスの革新により設計活動の効率化と短縮化、及び建設工期の最適化に取り組んでいる。

2.1.2 国内計画プラントへの取組み 電源開発(株)

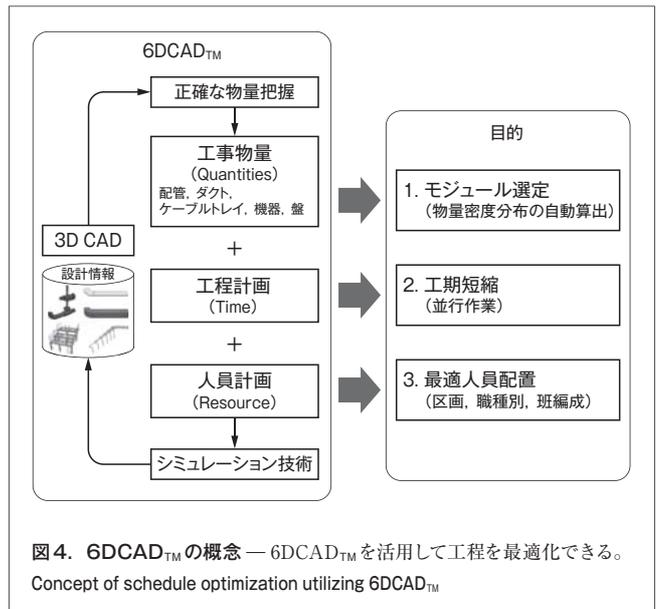


図4. 6DCAD™の概念—6DCAD™を活用して工程を最適化できる。
Concept of schedule optimization utilizing 6DCAD™

大間原子力発電所に続き、東京電力(株)東通1号機が着工に向けて建設準備を進めている。当社は、タービン設備の建設と原子炉圧力容器及び炉内構造物の機器製作を受注しており、先行する大間原子力発電所での実績と知見も踏まえながら、ABWR建設を推進していく。

また、建設計画中の東京電力(株)福島第一原子力発電所7、8号機や、中部電力(株)浜岡原子力発電所6号機なども、当社の最新ABWRが採用されるように、受注活動を展開している。当社は、1966年以降、国内22基のBWR並びにABWRの建設、保全、及び運転サービスに取り組んできた経験を踏襲するとともに、合理的なプラントコンセプトを立案し、建設工期の更なる短縮や稼働率の向上を実現するためにABWRの価値向上を図り、国内向け及び海外向けコンセプトの中核部分を標準化した“世界に誇れる東芝標準ABWR”を提供していく。

2.2 海外での取組み

2.2.1 米国STP-3/4 当社は東芝アメリカ原子力エネルギー社(TANE)を2008年1月にワシントンDC近郊のフォールズチャーチ市に設立し、STP-3/4のABWRプロジェクトを遂行している(図5)。

建設に関するEPC契約は、2009年2月に米国の電力事業者であるサウステキサスプロジェクト ニュークリアオペレーティングカンパニー(STPNOC)と締結したもので、プラントの建設を含めたプロジェクト全体を一括して受注したものである。海外での新規原子力発電プラントの建設に関するEPC契約としては日本企業として初めてである。この契約は、STPNOCがテキサス州に新規に建設するSTP-3/4の契約であり、米国で初めてとなるABWRとして、1,400 MW級原子炉2基及び原子炉周辺設備の納入、エンジニアリング、建設工事などを含めたプロジェクト全体にわたるものである。



図5. STPサイト — STPサイトを鳥観したイメージである。
Bird's-eye view of South Texas Project (STP) site

当社は、基本設計を含むエンジニアリング全般と主要機器の納入を担当し、東芝グループのウェスチングハウス社 (WEC) もエンジニアリングや機器納入で参加している。建設に関しては米国大手建設会社が担当する。

2009年8月に当社は、NRCによる米国型 ABWR 原子炉供給メーカーとしての監査に合格した。これはSTP-3/4向けに原子炉を供給するにあたり、当社の設計及び品質管理が米国の原子力規制の要求を満たしていることを立証したものである。

米国での原子力発電所の建設及び運転にかかわる許認可も順調に進んでおり、建設・運転一括認可 (COL) 申請改定第3版の申請を2009年に完了し、2010年後半には改定第4版の申請を完了した。COL発給は2012年を予定している。COLは多くの申請について審査が進められているが、STP-3/4は

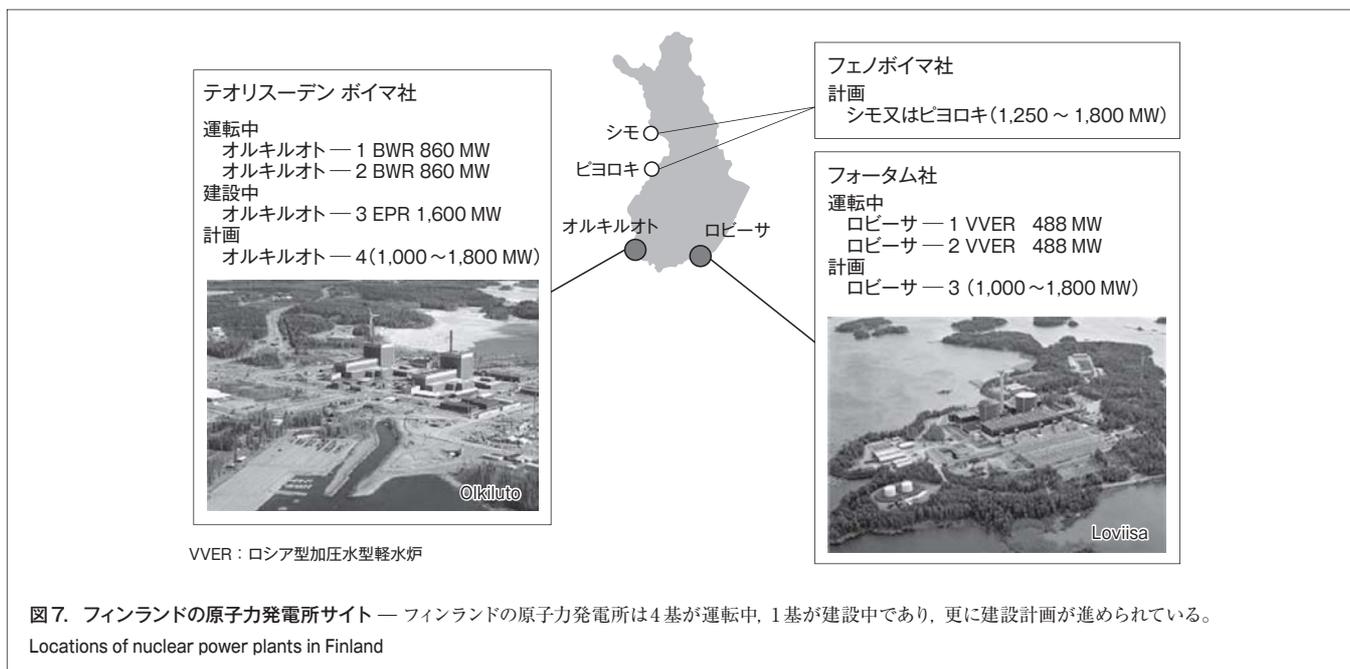


図6. STP3号機 原子炉圧力容器製造状況 — (株)IHI横浜第一工場
でSTP3号機の原子炉圧力容器を製造している。
Fabrication of reactor pressure vessel (RPV) for STP Unit No. 3

もっとも審査が進んでいるものの一つである。

STP-3/4は現在、基本設計をほぼ終了し、配置設計を含む詳細設計に移行しつつある。今後は詳細設計を進め、COL発給前に設計をほぼ完了し、本格着工を迎える予定である。主要機器の製作も長納期品について本格化しつつあり、原子炉圧力容器は既に製造が開始されている (図6)。ほかの原子炉系重要機器も当社工場です2010年後半から製造を開始した。

2.2.2 フィンランドプロジェクト フィンランドでは、図7に示すオルキオト及びロビーササイトで計4基の原子力発電所が運転中である。更に2003年にはオルキオトの3基目 (フィンランドとして5基目) として、フランスのアレバ社が設計した欧州型加圧軽水炉 (EPR) の建設が開始された。



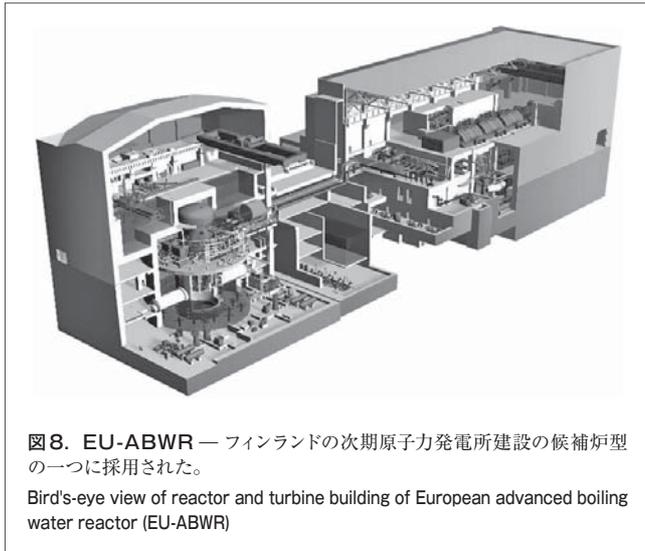


図8. EU-ABWR — フィンランドの次期原子力発電所建設の候補炉型の一つに採用された。
Bird's-eye view of reactor and turbine building of European advanced boiling water reactor (EU-ABWR)

このような状況にあつて、地球温暖化対策として二酸化炭素 (CO₂) 排出抑制が世界中で推進されていることを受け、フィンランドでもテオリスーデン ボイマ社 (TVO) 及びフェノボイマ社の両電力会社が、次期原子力発電所建設に向けた計画をそれぞれ独自にフィンランド議会に提案し、2010年7月1日に承認 (DiP: Decision-in-Principle) された。

当社の欧州向けABWR (EU-ABWR) は定格電気出力1,600 MWを持ち、かつ安全面で欧州の安全規制基準を満足する (図8)。2009年に提案されたいずれのDiPにもEU-ABWRが候補炉型の一つに採用されたが、これはABWRが先進的な第三世代炉であること、及び国内での約10年以上の運転実績が評価されたものと考えている。今後、入札によるメーカー決定や建設許可などのステップがあるが、原子力発電所の規制が世界でもっとも厳しい国の一つであるフィンランドでABWRが認められたことの価値は大きいと言える。

設計上の主な特徴として、以下が挙げられる。

- (1) 航空機落下に備えて強化された原子炉建屋
- (2) 安全系N機当たり2台の予備機を備えるN+2基準の採用
- (3) I&C (計装制御系) 分散化による共通原因故障の低減
- (4) コアキャッチャ (炉心溶融物保持装置) の設置
- (5) 静的格納容器冷却系 (PCCS)
- (6) 1,600 MWを達成させる超長翼ブレード (Super Long Blade) を用いた高効率タービンの採用

EU-ABWRの非常用炉心冷却系 (ECCS) 及び残留熱除去系 (RHR) は従来と同じ3系統で構成されるが、N+2基準に対応して1系統当たりの最大負荷を従来設計の50%から100%に引き上げている。また、シビアアクシデント対策として、圧力容器直下の床部分にコアキャッチャを設けるとともに、ポンプなどの冷却水循環駆動源が動作できない状態でも格納容器内部の冷却が行えるPCCSを、従来の安全系に追加して設置している。

2.2.3 そのほかのABWR世界展開 ABWRは米国NRCからの設計認証 (DC) を取得しているとともに、現時点では唯一豊富な運転実績を持つ先進的な原子力発電プラントである。また、日本では、継続的にBWR及びABWRプラントの建設が行われてきたため、強固なサプライチェーンが維持されている。加えて、2007年に発生した新潟県中越沖地震からもABWRの高い耐震性が示されている。これらの強みを生かし顧客のニーズや指向に沿うようにABWRを世界に展開していく。

米国では建設と運転の許認可を一括して申請するCOLを適用することが一般的である。米国にABWRを建設する場合、取得済みのDCに加えて、先行しているSTP-3/4で申請済みのCOLがリファレンスCOLA (R-COLA) として後続プロジェクトで参照でき許認可のリスクや労力を大幅に低減できる。この強みを生かし、米国のBWR指向の顧客を中心にABWRを提案していく。

欧州向けでは、まずフィンランドを対象に、欧州の許認可要求や規格及び基準を満足するABWRを開発している。欧州には、フィンランドに加えて、スウェーデン、スイスなどBWR指向を持つ顧客や、既にBWRを所有し運転している顧客が存在する。また、国や地域によっては、耐震要求が厳しい場合もある。これらを考え合わせてABWRを提案していく。

更に、ベトナムに対しては、国内の電力会社、メーカー、及び (株) 産業革新機構が出資して2010年に設立された“国際原子力開発 (株)”を中心に国家プロジェクトとして展開することが決まっており、当社もこの枠組みの中で、積極的に貢献していく。

3 次期ABWR世界展開に向けた研究開発の推進

次期ABWRの世界展開を支える技術として、設備の故障が何重にも重なるなど、安全設計として想定している以上の事象により炉心が重大な損傷を受けるようなシビアアクシデントの対策設備の開発や、流動及び過渡安全の解析技術の高度化を進めている。

3.1 コアキャッチャ

欧州では新設プラントに対し炉心溶融事故対策設備の設置が要求されており、当社は前述のとおりABWRのコンパクトな格納容器に納まる信頼性の高いコアキャッチャの開発を行っている (図9)。

東芝型コアキャッチャの特長は、傾斜冷却チャンネルを用いて炉心溶融物を底面からも冷却し、上部プールとの冷却水の自然循環によって長期的な冷却性能を確保することである。これにより、ABWRの下部格納容器床面積に納まり、炉心溶融物からの熱流束に対し十分な除熱能力を持つコアキャッチャを提供することができる。

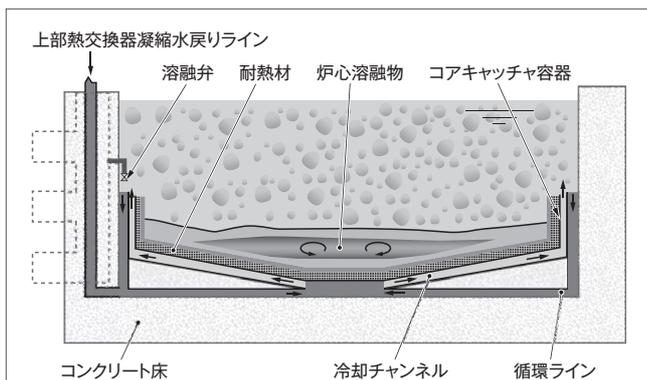


図9. コアキャッチャの断面 — EU-ABWRでは、原子炉圧力容器から炉心溶融物が落下した場合に、耐熱材を張ったコアキャッチャ容器で受け止め、炉心溶融物を上面及び底面から冷却する。
Cross-sectional view of core catcher for EU-ABWR

コアキャッチャの除熱能力は、冷却チャンネルを実長で模擬した自然循環熱伝達試験装置を用いて確認した。また、冷却チャンネルを保護するための耐熱材の設計、及び耐熱材や冷却チャンネルの高温構造解析を実施し、炉心溶融物保持直後から長期冷却に至るまでの保持能力を確認した。

3.2 ハイブリッド二相流解析手法

BWR炉心燃料内の流動様式遷移を伴う二相流動を解析により評価するためには、流体中に存在する小さな気泡の挙動から、気泡体積割合（ポイド率）の増加時に形成される大きな気泡の界面変形挙動までを評価する必要がある。現状の汎用CFD（数値流体力学）では、小気泡の挙動と大気泡界面の変形挙動を同時に扱うことができないため、大小気泡が混在

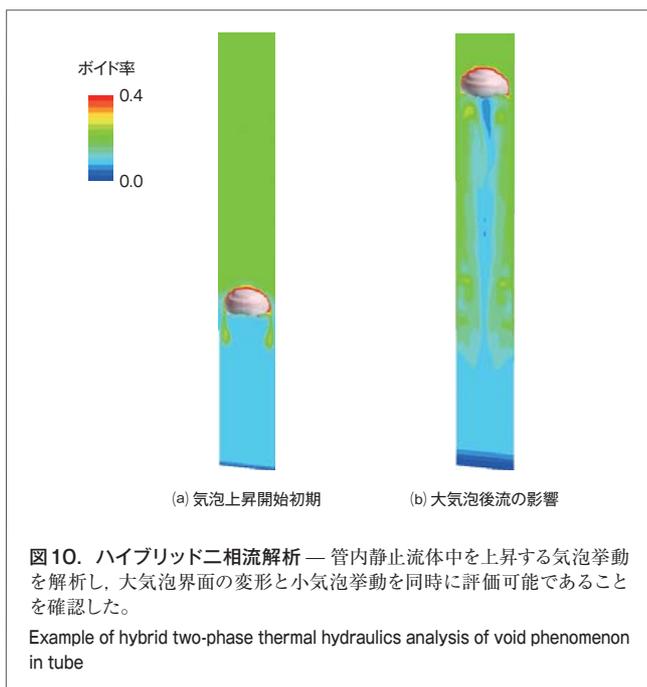


図10. ハイブリッド二相流解析 — 管内静止流体中を上昇する気泡挙動を解析し、大気泡界面の変形と小気泡挙動を同時に評価可能であることを確認した。

Example of hybrid two-phase thermal hydraulics analysis of void phenomenon in tube

する流動評価への適用を可能としたハイブリッド二相流解析手法を当社独自に開発した。

この手法では、小気泡を含む流れの解析に二流体モデルを、大気泡の界面変形の解析に界面捕獲法の一つであるVOF (Volume of Fluid) 法を適用し、これら異なる二つの手法をカップリングすることで大小気泡の同時解析を実現している。更に、小気泡が合体して大気泡を形成する過程を模擬するため、解析手法を二流体モデルからVOF法に切り替える機能を開発した。検証を進めて解析結果の信頼性向上を図る。解析の一例を図10に示す。

前節で例に挙げたシビアアクシデント対策設備やここで例に挙げたハイブリッド二相流解析による過渡安全の解析技術の高度化のほか、今後世界各国のニーズと規制要求に合致する設備及び高性能化を支える基盤技術の研究開発を更に進め、ABWRの国内外への展開を支援していく。

4 あとがき

これまで述べたように、ABWRは世界で唯一豊富な建設と運転実績を持つ第三世代軽水炉であるとともに、既に米国でABWRのDCを取得していること、また当社はNRCによるABWR供給メーカーとしての監査に合格していることなど、許認可並びに設計製造にあたって当社は建設運転に対する豊富な実績と経験を持つ。

今後、EU-ABWRの開発や更なる研究開発を通じて、これまでに蓄積された技術を適用してABWRを更に進化させていきたい。

これにより当社は、地球温暖化とエネルギーセキュリティ確保を両立できる原子力発電設備の世界的な供給ニーズに対して、グループ会社であるWECとともにいっそう貢献していく。



畠澤 守 HATAZAWA Mamoru

電力システム社 原子力事業部 原子力技術部長。
原子力発電所プロジェクト管理業務に従事。日本原子力学会
会員。

Nuclear Energy Systems & Services Div.



瀧野 聡志 FUCHINO Satoshi

電力システム社 原子力事業部 原子力フィールド技術部長。
原子力発電プラントの建設計画、現地建設、及び改良保全
工事の管理業務に従事。

Nuclear Energy Systems & Services Div.



中田 耕太郎 NAKADA Kotaro

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 原子
炉システム開発部長。原子力発電プラントのシステム開発に
従事。日本原子力学会、日本機械学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center