

原子力発電所の再稼働に向けた日立の取り組み

地球温暖化対策として二酸化炭素排出を実質ゼロにするカーボンニュートラルの実現が世界全体の課題として認識されている。さらにエネルギー市場が国際情勢によって大きく不安定化している中、日本国内においてはこうした課題の対応策として原子力発電所の再稼働が重要となっている。日立は、これらのカーボンニュートラル・電力の安全供給の実現に貢献するべく、再稼働に向けた取り組みを強化し、新規制基準に適合した世界最高水準の安全性を備えた原子力発電システムの提供に努めてきた。

本稿では、日立が原子力発電所の再稼働に向けて取り組んできた広範な安全性向上技術、さらに再稼働を実現するために導入を進めている安全対策工事技術について述べる。

木村 竜介 | Kimura Ryusuke

照沼 博之 | Terunuma Hiroyuki

福田 直浩 | Fukuda Naohiro

1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けた国際的な脱炭素への動き、また、ロシアによるウクライナ侵攻に端を發したエネルギー市場の不安定化を受けて、国内においても、電力の安定供給とカーボンニュートラル実現に貢献できる原子力発電所の再稼働推進が重要となってきた。

日立は、福島第一原子力発電所事故から得た教訓に基づいて、BWR (Boiling Water Reactor) プラント安全対策の基本方針を策定し、原子力発電所の安全裕度をさらに高めるための安全性向上技術の開発を推進してきた^{1) 2)}。現在、原子力発電所の再稼働を実現するため、電力事業者による新規制基準への適合性審査のサポート、安全対策設備の原子力発電所への導入を推進している。

本稿では、原子力発電所の再稼働に向けて日立が技術開発に取り組んできた安全対策について述べるとともに、安全対策設備の速やかな実装を実現する安全対策工事技術について述べる。

2. 再稼働に向けた安全対策設備の導入

2.1

安全対策設備の概要

原子力発電所の安全裕度をさらに高め、また原子力発電所の再稼働に向けた規制基準への適合を推進するために配備を進めている設計基準事故対処設備と重大事故等対処設備の概要について述べる。

日立はこれらの対策設備の開発、設計を進めるとともに、事故進展解析などの解析技術を用いて対策設備の有効性評価を実施し、事故時においても安全性を維持でき

る機能があることを確認している。

(1) 設計基準事故対処設備

設計基準事故に対して原子力発電所の安全性が損なわれないよう、さまざまな設計基準事象 [内部火災, 内部溢水, 外部事象 (地震, 津波, 竜巻など)] の対策設備を導入した。主な強化内容を表1に示す。

(2) 重大事故等対処設備

重大事故などの発生に対しても、著しい炉心損傷の防止, 格納容器破損の防止などを行う目的で, 安全性向上技術の開発, 設備設計, 系統設計を実施し, 実機への導入を進めている。主要な安全対策設備を表2に示す。

2.2

安全性向上技術の開発

安全対策設備に適用されている安全性向上技術について詳細を述べる。

(1) 溶融デブリ冷却設備

重大事故時において, 溶融炉心燃料 (溶融デブリ) が原子炉圧力容器を破損し, 原子炉格納容器下部に落下した場合, 溶融デブリが格納容器床面のコンクリートを侵食し, 原子炉格納容器のパウダリ機能が損なわれる可能性がある。本設備は, 高耐熱性の材質の採用により,

表1 | 設計基準事故対処設備の強化内容

主な設計基準事象 (地震, 内部火災, 内部溢水) に対する安全性確保のための対応策を示す。

対策	強化内容
地震対策	<ul style="list-style-type: none"> ・サポート追設などの耐震補強 ・可搬型設備の分散配置 ・振動試験による耐性確認
内部火災対策	<ul style="list-style-type: none"> ・難燃性, 不燃性材料の使用 ・火災感知設備の設置 ・消火設備の設置 ・耐火壁による区画の防護 など
内部溢水対策	<ul style="list-style-type: none"> ・水密扉の設置 ・堰 (せき) の設置 ・漏洩検出器の設置 など

表2 | 重大事故等対処設備の概要

重大事故などの発生時に, 著しい炉心損傷の防止, 格納容器破損の防止, 放射性物質の放出抑制などを行う目的で導入が進められている主要な安全対策設備を示す。

機能	主要な安全対策設備
原子炉冷却機能	<ul style="list-style-type: none"> ・高圧代替注水設備 ・低圧代替注水設備 ・減圧機能強化設備 など
格納容器破損防止機能	<ul style="list-style-type: none"> ・格納容器スプレイ設備 ・代替原子炉補機冷却水設備 ・フィルタベント設備 ・格納容器下部注水設備 ・溶融デブリ冷却設備 など
原子炉建屋等損傷防止機能	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋水素処理設備 ・水素濃度監視設備 など
運転員被曝低減	<ul style="list-style-type: none"> ・ブローアウトパネル閉止装置 など

原子炉格納容器下部への注水設備と組み合わせて, 溶融デブリと原子炉格納容器パウダリの接触防止, パウダリ機能を維持することを目的としている。

ここでは, 格納容器型式の特徴を踏まえて開発した代表的な二つの方式について述べる。

サンプ防護方式³⁾は, 格納容器下部にサンプが設置されている格納容器構造に対する溶融デブリ冷却設備である。溶融デブリが格納容器床面に落下した場合でも, 溶融デブリからサンプを防護する構造となっている。床面敷設方式は, 圧力容器を支えるペダスタルの外側にサンプが設置されている格納容器構造に対する設備になるが, 格納容器床面に耐熱材を敷設し, 床面コンクリートの侵食を抑制する (図1参照)。いずれの方式も, 通常運転時における原子炉冷却材の漏洩を検知するためにサンプへつながる流路を設けている。この流路構造は, 実験的知見に基づく凝固評価モデルを活用し, 流路内で溶融デブリを凝固させることによりサンプへの溶融デブリの流入を防ぐスリット形状・流路面積を備えた設計としている。

(2) 原子炉建屋水素処理設備

重大事故時において, 炉心損傷の進展に伴い発生する水素ガスは格納容器内に保持されるが, 格納容器内圧力が上昇する状況では, 格納容器のフランジ部などを通じて原子炉建屋内へ漏洩する可能性がある。漏洩水素による原子炉建屋内での水素爆発を防止するための対策の一つとして, PAR (Passive Autocatalytic Recombiner: 静的触媒式水素処理装置) を設置する (図2参照)。PARは, 触媒反応を用いて可燃性ガス (水素ガス, 酸素ガス) を再結合させて受動的に水素処理する設備であり, 運転員による起動操作, 電源が不要な設計としている。PAR

図1 | 溶融デブリ冷却設備 (床面敷設方式) の概要図

耐熱材 (ZrO₂) の採用により, 原子炉格納容器下部への注水設備と組み合わせて, 溶融デブリから原子炉格納容器パウダリを防護する。

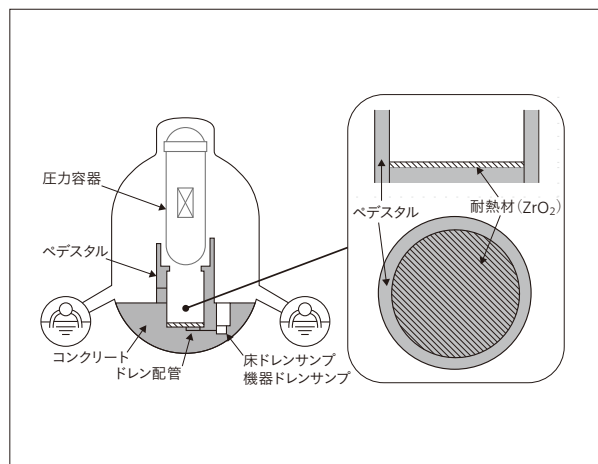
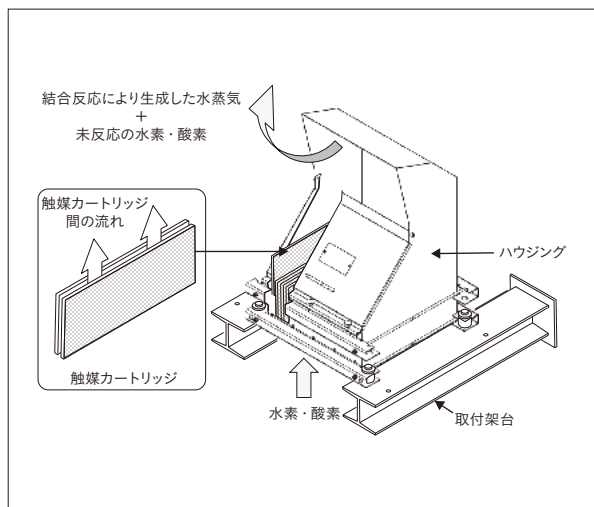


図2 | 静的触媒式水素処理装置 (PAR)

PAR (Passive Autocatalytic Recombiner) はハウジングと触媒カートリッジで構成されており、自然循環により下部から流入した可燃性ガス（水素・酸素）が触媒カートリッジの触媒（パラジウム）層にて結合反応を起こし、水蒸気となって上部出口より排出される構造となっている。



の設置場所は、三次元流動解析技術を活用し、十分な水素処理性能を発揮できる適切な箇所を選定している。

(3) ブローアウトパネル閉止装置

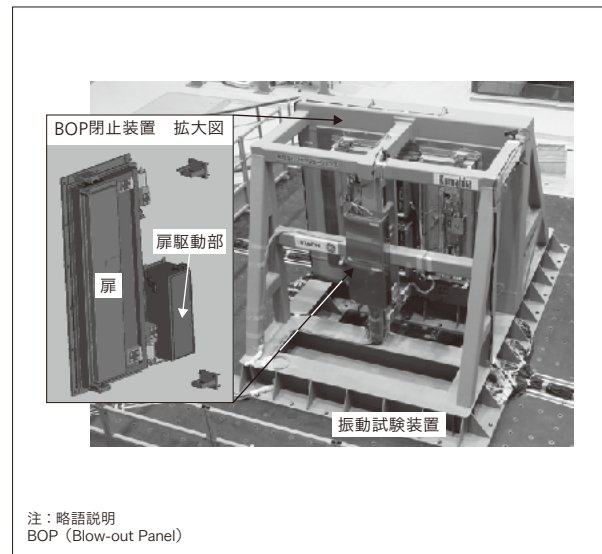
原子力発電所には事故時に原子炉建屋内の圧力・温度を低下させるための圧力開放機構として、BOP (Blow-out Panel) が設置されている。一方で、開放したBOPの開閉口は過酷事故時には放射性物質の放出経路になり得る。そこで過酷事故時に運転員の被曝リスクを低減するために、速やかに閉止操作が可能であり、地震動に対しても閉止機能を維持できるBOP閉止装置を開発した。

原子炉建屋の構造に応じて設置対応が可能であるスライド型と横開き型のBOP閉止装置を開発している。BOPを開放した後、運転員操作によって電動で閉止する機構が備えられている。スライド型BOP閉止装置は、開放したBOPを1台で閉止することが可能な高さ5 mの大型電動扉である。横開き型BOP閉止装置は、コンパクトな形状であり、複数の組み合わせによりさまざまなBOP形状への適用が可能となるよう設計している。

スライド型・横開き型のいずれの型式も、振動試験装置を用いて実規模大による加振試験を実施し、東日本大震災の地震を大きく超える条件での耐震機能維持を確認している。さらに加振試験後に気密性能試験を行い、規格水準を上回る気密性を確認している（図3参照）。また横開き型は事故時の機能健全性を確認するため、放射線、高温高湿度などの環境を模擬した暴露試験による動作確認を実施し、BOP閉止装置の機能信頼性を向上させている。

図3 | 横開き型BOP閉止装置の加振試験

実規模大での加振試験を実施し、東日本大震災を大きく超える振動条件で耐震機能維持を確認した。



3. 安全対策工事技術

原子力発電所への導入を進めている大規模な安全対策設備の速やかな実機適用に向けた安全対策工事技術として、現在開発を進めている3D (Three Dimensions) レーザー計測技術を活用した安全対策工事の合理化への取り組みについて述べる。

3.1

3Dレーザー計測技術による 点群データの活用基盤の開発

日立は、原子力プラントEPC(Engineering, Procurement and Construction) 業務で3Dレーザー計測技術を用いて取得した点群データを活用し、現場での配管ルート新設のための寸法計測や3D-CAD (Computer-aided Design) データ化、施工図作成などに利用している。これに伴い、点群データを設計部門間で横断的に共有するためのインフラとなる点群アクセスツールを開発した。このツールは複数の点群データフォーマットをサーバ上で集中管理し、専用ビューアおよび外部ツールとの連携機能を備えることでユーザーの多様な利用パターンに対応している。また、ユーザーが大容量の点群データを活用するために、有効なデータを残す間引き技術で高速化を実現し、インターフェースの強化を図っている。3Dレーザー計測技術を利用した点群データ活用のプロセスと点群データを図4に、活用事例を表3に示す。

図4|3Dレーザー計測技術を利用した点群データ活用のプロセス

3Dレーザー計測技術を活用して現場で点群データを採取し、専用ツールで管理することで、設計業務だけでなく工事計画などへも活用を拡大できる。

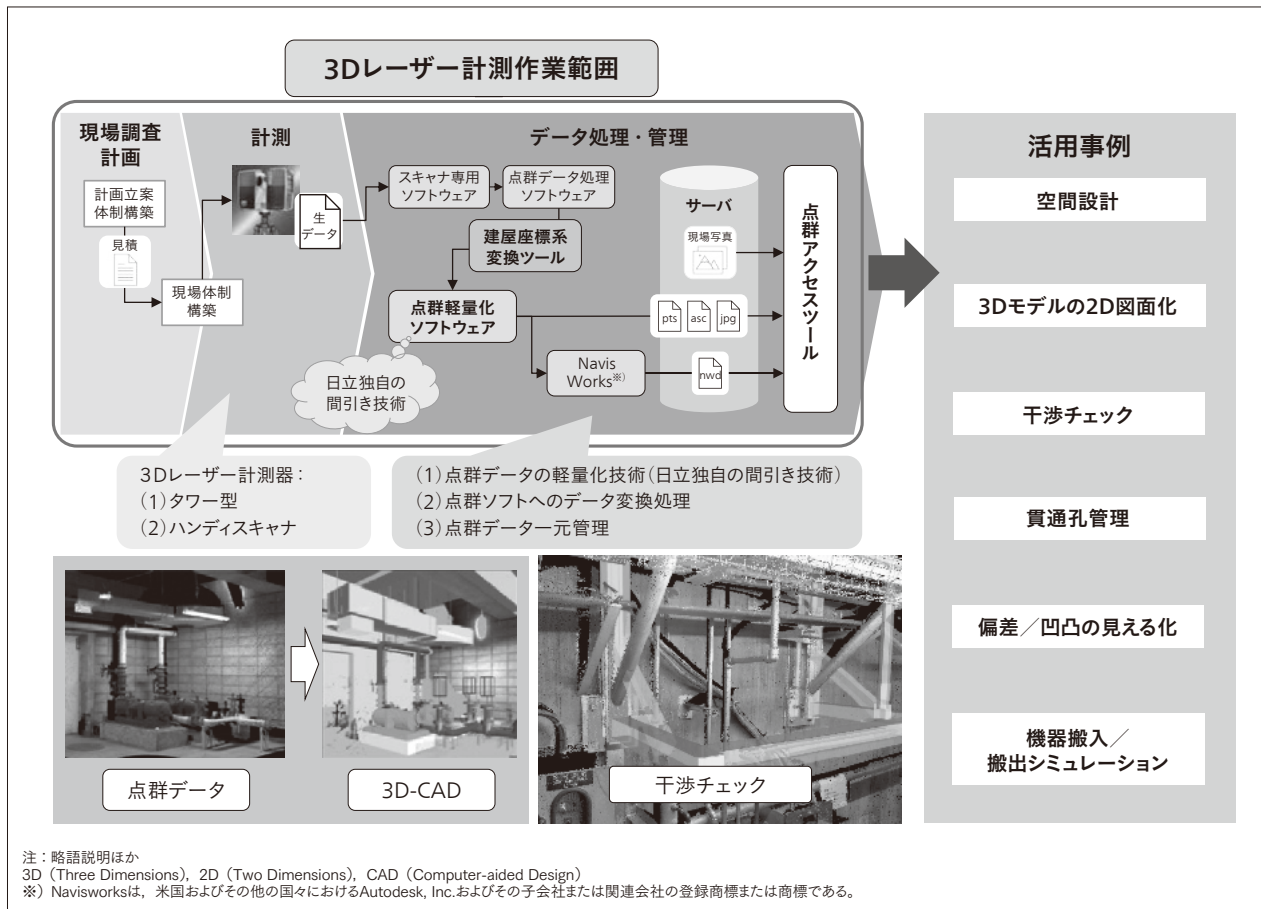


表3|3Dレーザー計測データの活用事例

現場情報を点群データとして活用することによりさまざまな設計・工事業務に活用できる。

活用事例	
空間設計のための採寸	机上で採寸など現場調査を実施
3Dモデルの2D図面化	サポート移設/追設検討のため、モデル化
干渉チェック用データ	計画配管 (CAD) との干渉を確認
偏差/凹凸の見える化	複雑な設備形状の計測
貫通孔管理	アズビルトでの貫通孔情報表示
機器搬入/搬出シミュレーション	搬出入に伴う干渉確認・ルート計画

3.2

安全対策工事の合理化検討への適用

原子力発電所の再稼働に向けて、前章で紹介したさまざまな安全対策設備の実機導入を進めている。安全対策工事期間中は、原子力発電所内設備の配管、空調、電気、計装、耐震補強、耐火工事など、多岐にわたる改造工事を並行して実施する必要がある。また改造工事に伴う足場、資材仮置き場、仮設電源、溶接機などの仮設設備についても同様に発電所内に配置されており、工事進捗に伴い関連設備の配置情報は日々変化する状況にある。

これらの安全対策工事を安全かつ円滑に遂行するためには、発電所設備の状況に応じて、機器搬入ルート上に

干渉する設備を確認し、干渉回避策を計画することで、機器の搬出入作業を円滑に実施可能にするほか、移動中の衝突による既存設備や新規搬入機器の破損の未然防止を可能にする干渉確認・ルート計画が極めて重要となる。

ここでは、機器搬出入に伴う干渉確認・ルート計画の具体的な例として、盤の更新工事における既設盤の搬出、新設盤の搬入作業を例に、3Dレーザー計測技術を活用した場合の工事計画の合理化に関わる検討を紹介する。

盤の更新工事では、工事着手前に干渉確認・ルート計画を策定するために、以下に示す(1)～(6)の作業が必要となる。

- (1) 更新する盤の形状を図面、仕様書から確認

表4| 3Dレーザー計測技術活用の効果

工期短縮，高度な情報管理，作業安全性の向上の観点で効果が期待できる。

工期短縮	<ul style="list-style-type: none"> 現場での寸法測定作業が低減し，現場調査時間が短縮 最新情報に基づく搬出入ルートのシミュレーションが可能（干渉確認による寸法／ルートの変更・再検討が容易）
高度な情報管理	<ul style="list-style-type: none"> 現場のアズビルト環境を基に，搬出条件（作業エリア，搬出物寸法，台車の高さなど）を入力することで，搬出物の「動線（鳥瞰型／没入型）」を確認 点群データ／CADモデル／施工図から抽出したベクターデータの情報を活用することで，干渉に関する「対象機器」，「属性」，「位置」，「範囲」をデジタルデータとして確認 最新のエリア情報の一括管理による干渉物，干渉物対策案の集約漏れ防止
作業安全性の向上	<ul style="list-style-type: none"> 現場作業を低減することで，工事災害リスク，管理区域での被曝リスクが低減 現場作業指示者・作業者への搬出ルートの手順に関わる情報共有が容易

(2) 盤搬出入ルート検討の現場調査を実施

(3) 干渉物となる可能性のある設備を抽出，リスト化し，関連設計部署へ干渉物回避策検討依頼を実施

(4) 関連設計部署による干渉回避策検討のため現場調査を実施

(5) 関連設計部署が検討した干渉回避策案を作成，集約，リスト化し，工事計画書，施工図に反映

(6) 干渉回避不可の設備がある場合は，盤本体を分割搬入，組み立てできるように盤仕様を調整

これらの作業は，他改造工事，発電所運転計画の影響によって現場調査ができない状況や干渉回避の可否の確認が遅れることによる後戻り作業に大きく影響を受けるため，工事工程長期化のリスクがある。また，現場調査が必須であることから，管理区域を現場調査する際の被曝リスク，現場調査における工事災害などのリスクが存在する。

ここで3Dレーザー計測技術による点群データを活用することで，高度な情報管理が可能となり，工期短縮，作業安全性の向上の観点で，表4に示す干渉確認・ルート計画の合理化が可能になると考えている。現在，3Dレーザー計測技術の適用について実証実験を実施しており，活用技術の有効性を確認している。今後，試験的に実作業に3Dレーザー計測を取り入れ，安全対策工事の合理化に向けた取り組みをさらに推進していく計画である。

4. おわりに

国内における電力の安定供給と脱炭素社会をともに実現していくうえで，原子力発電所の再稼働は非常に重要な選択肢の一つになっている。本稿で紹介した技術は，原子力発電所の規制基準への適合性を備えていることはもとより，さらなる安全性向上に大きく貢献するものであり，また，安全対策工事の安全かつ円滑な推進のために活用が期待できるものである。

日立は，今後も原子力発電所の再稼働に向けた取り組みを通じて，電力の安定供給の確保，カーボンニュートラル実現に向けて貢献していく。

参考文献など

- 1) 松浦正義，外：福島第一原子力発電所事故の教訓と安全性向上の取り組み，日立評論，94，11，802～806（2012.11）
- 2) 小澤隆，外：世界最高水準の安全性を実現する原子力発電システム，日立評論，99，2，206～211（2017.2）
- 3) 日立GEニュークリア・エナジー株式会社，新規制基準審査への対応，<https://www.hitachi-hgne.co.jp/activities/restart/support/index.html>

執筆者紹介



木村 竜介

日立GEニュークリア・エナジー株式会社
原子力生産本部 原子力計画部 所属
現在，原子力発電所の安全設計・安全評価業務に従事
日本原子力学会会員



照沼 博之

日立GEニュークリア・エナジー株式会社
業務プロセス改革本部 業務プロセス改革部 所属
現在，会社全体のDXソリューション推進活動に従事



福田 直浩

日立GEニュークリア・エナジー株式会社
原子力生産本部 原子力サービス部 所属
現在，原子力発電所の工事見積・原価管理に従事