

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

Lessons Learned from Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident and Consequent Safety Improvements

松浦 正義

Matsuura Masayoshi

佐藤 深一郎

Sato Shinichirou

久持 康平

Hisamochi Kohei

守屋 公三明

Moriya Kumiaki

地球温暖化対策の有効な手段として、また、石油・石炭などの化石燃料の安定供給に対する不安を背景に、世界的な原子力発電所建設のニーズが高まりを見せていた中、2011年3月に東京電力福島第一原子力発電所の事故が発生した。この事故に対する海外原子力市場の反応は国によりさまざまであるが、アジアや中東などの新規導入国では、事故の経験を精査して必要な対策を反映することを前提に、原子力推進政策の維持を表明している国も多い。

日立グループは、これまで40年近くに及ぶ原子力発電所の建設経験に福島第一原子力発電所事故の教訓を生かし、さらに安全性を向上させたABWRを提供していくとともに、既設プラントへの水平展開も踏まえ、より安全で信頼されるプラントの運転・建設に貢献していく。

1. はじめに

2011年3月に発生した東日本大震災とそれに伴う東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故は、日本国内に甚大な被害をもたらした。

日立グループは、この事故を真摯（しんし）に受け止め、被災地域および福島第一原子力発電所の復旧・復興に全面的に協力するとともに、原子力発電の信頼回復に取り組んでいる。

これまで日立グループは、BWR（Boiling Water Reactor：沸騰水型原子炉）の国内初号機の建設に参加して以来40年近く、信頼性・安全性・経済性の向上に努め、20基を超える建設実績を重ねてきた。そして、BWR各電力会社、GE社（General Electric Company）、株式会社東芝と共同で開発したABWR（Advanced Boiling Water Reactor：改良型沸騰水型原子炉）は、世界で唯一運転実績のある第三世代プラス〔DOE（U. S. Department of Energy：米国エネルギー省）による原子炉の定義〕と位置づけられている。日立グループはすでに営業運転を開始しているABWRの4基

すべての建設に携わっており、現在建設中のABWRの主要部分も担っている。さらに、2011年7月、リトアニア共和国が計画するピサギナス原子力発電所建設プロジェクトのSI（Strategic Investor）に選ばれ、現在、正式受注に向け、福島第一原子力発電所事故を踏まえた対策などで安全性を高めたABWRを提案している。

ここでは、福島第一原子力発電所事故から得られる教訓に基づく安全対策の基本方針とABWRに適用する具体的な対策設備の概要、および既設国内プラントへの安全対策展開への方針について述べる。

2. 福島第一原子力発電所事故の教訓

事故により福島第一原子力発電所が受けたプラント状態を整理し、そこから得られた教訓について述べる。

2.1 福島第一原子力発電所事故のプラント状態

福島第一原子力発電所では、2011年3月11日午後2時46分ごろに地震加速度大スクラムにより、プラントが自動停止した。この地震によって外部電源が喪失したため、非常用ディーゼル発電機の自動起動によって非常用電源が確保された。その後、午後3時35分ごろに来襲した津波で発電所は被災し、非常用海水系などの取水設備が水没するとともに、建屋周辺のヤードは浸水し、さらに建屋にも浸水して地下階の一部の機器が水没することとなった。

この結果、非常用海水系が使用不能となり、最終的な熱の逃がし場を喪失する状態（LUHS：Loss of Ultimate Heat Sink）に陥った。また、非常用海水系が使用できないことから、非常用ディーゼル発電機が使用不能となり、全交流電源が喪失する状態（SBO：Station Blackout）となった。さらに、建屋内の浸水の影響で電源盤の一部が使用不能となり、その中でも直流電源設備の使用不能により直流電源

喪失状態となったことで、制御電源とプラント状態監視機能を喪失し、プラントの事故管理に大きな影響を与えることになった。

福島第一原子力発電所事故の事象進展の1号機の例と、得られた教訓を関係づけて図1に示す。

2.2 事故から得られた教訓²⁾

ここでは、福島第一原子力発電所の1号機を例に、事故の事象進展の分析から得られた七つの教訓について述べる。なお、2号機と3号機は、事象進展は異なるものの、同様の教訓が得られるものとする。

2.2.1 教訓1: 電源盤など重要設備の配置改善と可搬設備の活用およびアクセス手段の確保

津波に対しては、可能なかぎり高位置に重要機器を配置すること、および水密化は有効である。しかし、給排気口の存在や過大水撃力によって完全防御が困難になることを考え、可搬設備を活用することを想定して緊急取付口を確保し、アクセスルート形成のための重機を配備する。

2.2.2 教訓2: 隔離弁の構成と在り方

事故時に隔離弁を開操作できなかったことが指摘されているが、隔離優先を基本としつつ、最低限の重要箇所は隔

離弁を遠隔もしくは手で開操作ができる手段(隔離弁の格納容器外側設置、予備の電源や空気源の常備)を追加しておく。

2.2.3 教訓3: 重要機器に対する予備直流電源の常備

直流電源の喪失に伴う計装機能喪失によってプラント状態の把握が困難になったこと、直流電源を必要とする高圧系〔IC (Isolation Condenser: 非常用復水器), HPCI (High Pressure Coolant Injection System: 高圧注水系)〕の機能喪失によって低圧注水系ラインアップの時間的余裕が不足したこと、さらに、逃がし安全弁による減圧が遅延したことから、これら重要機器への可搬の直流電源もしくは予備の直流電源を準備しておく。

2.2.4 教訓4: 計装の信頼性・信憑(びょう)性と対応操作

AM (Accident Management) 上重要なプラント状態監視項目については、計測器の環境条件(苛酷事故条件の考慮)の見直し、信憑性を判断するための別の手段の準備、さらに信憑性がなくプラント状態の監視ができない場合の対応について準備する。

2.2.5 教訓5: 注水系/冷却系の多様化

設計想定を超えた機能喪失(長期水源の確保も含む)に対するプラント外部からの救援・支援を含めた多様化が求

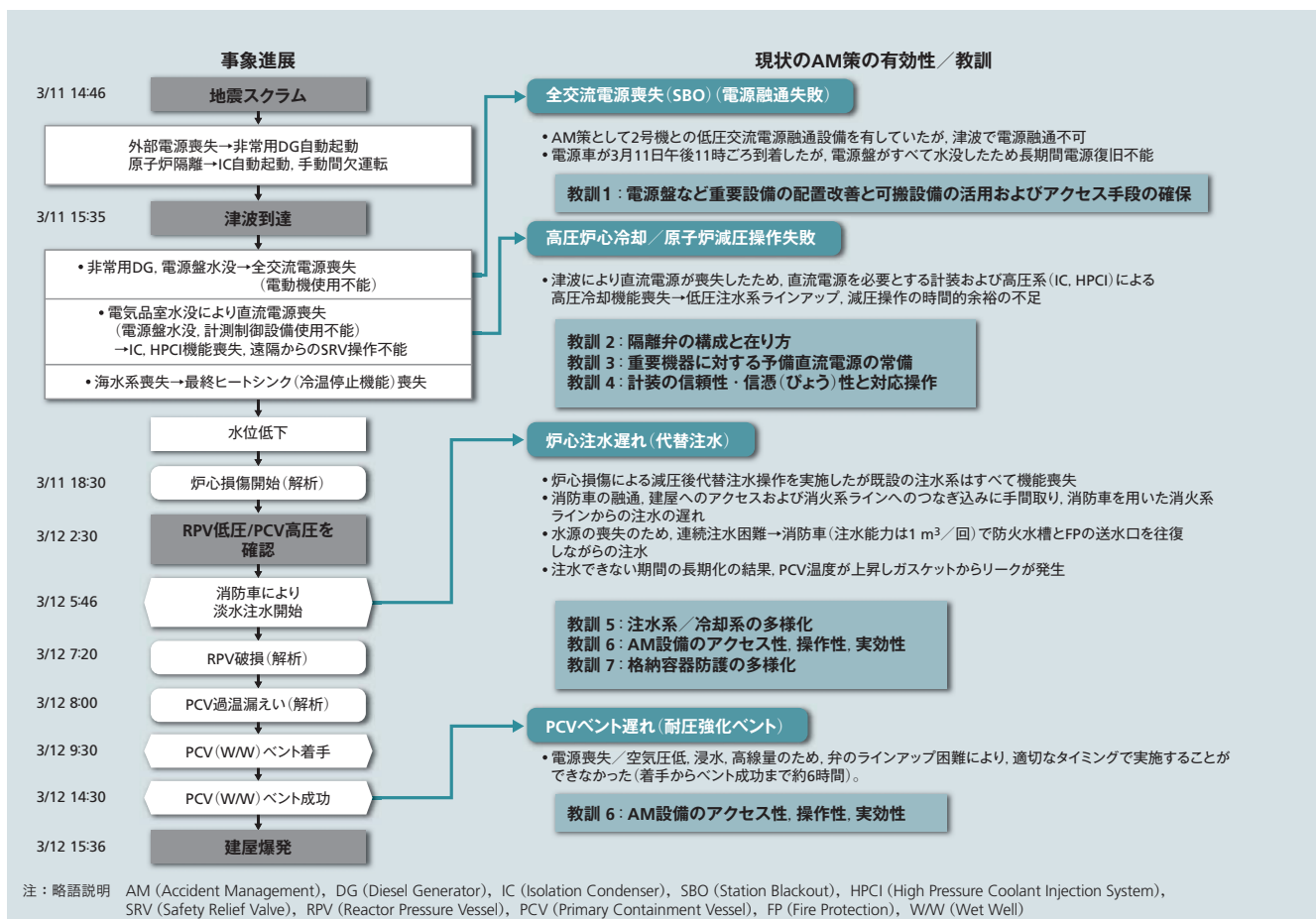


図1 | 事象進展と現状AM設備の有効性から得られる教訓¹⁾

福島第一原子力発電所の事象進展(1号機の例)において現状AM設備の機能状態から、得られた教訓を関係づけて示す。

められる。プラント内本設設備の水密強化や建屋配置による防護強化に加え、さらに可搬の設備を含めて多様化し、広範なシナリオに対応できる柔軟さを確保する必要がある。

2.2.6 教訓6：AM設備のアクセス性、操作性、実効性

AM設備操作に必要な弁が格納容器近傍に設置されているため接近が困難であったことや、外部からの注水設備のつなぎ込みが困難で系統ラインアップが遅延したことなどから、AM設備のアクセス性や操作性など、実効的な設備改善を行う。

2.2.7 教訓7：格納容器防護の多様化

炉心冷却が十分でなかった結果、格納容器内が過温状態となり、非金属部が劣化し、放射性物質が漏洩（えい）した可能性が考えられる。そのため、格納容器防護として、炉心の冷却を第一優先としつつも、格納容器内の冷却および格納容器外からの冷却も必要となる。

3. 安全対策の基本方針

福島第一原子力発電所の事故の経験と教訓を整理すると、地震や津波のような影響範囲の大きい外的事象においては、設備の使用条件を超える被害がサイト全体に及ぶことを考慮すべきである。そのため、設計基準を設定した防護設備を再検討しつつ、その想定を超えた場合の準備として柔軟性を持つ設備が重要であり、これら設備の実効性を確保するためにはアクセスへの配慮などが求められる。以上を踏まえた安全対策の基本方針は次のとおりである。

第一に、外的事象の設計基準荷重から重要な安全設備を防護することである。例えば、防潮堤、建屋への水密扉設置、全交流電源喪失に対応する設備の再配置などがある。

第二に、これら安全設備の防護が破られた場合の可搬式設備による対応と、柔軟な対応準備（設計条件を超えた外的事象への対策）である。さらに、放射性物質の漏洩に対する格納容器の耐性向上も重要である。

第三に、大規模な外的事象においては、サイト全体の被害が大きいこととオフサイトの協力が必要になることを想定すると、その連携を円滑に行うためには、対応操作がなるべく単純であること、そして柔軟性のある可搬式設備を中心に対応策を構成できることである。

4. 安全対策設備の概要

4.1 ABWRの安全対策設備の概要

原子力発電プラントは、深層防護を基本思想とし、多重、多様な手段で安全性を確保する設計を行ってきた。安全設備の設計においては、さまざまな事故シナリオを想定し、そのシナリオに適切な裕度を確保した設計条件を設定することで確実に機能する設備を設計する。さらに、想定した

事故シナリオに包絡されない事態に対しては、そのリスク低減のため、安全設備以外の設備を使って原子炉への注水や、原子炉で発生する熱の除去などをマネジメントするAM設備を備えている。軽水炉の代表的なプラント、およびABWRを含む第三世代原子炉の内的事象に対する確率論的安全評価を図2に示す。ABWRは、世界最高水準の安全性を有していることが示されている。

BWRは、発生した蒸気を直接タービンに移送する直接サイクル方式をとるシンプルな構造である。日本や米国を中心に発展し、ABWRはその集大成の炉型である。この直接サイクル方式とすることで、低い運転圧力、つまり同じ軽水炉であるPWR (Pressurized Water Reactor：加圧水型原子炉) の半分以下の原子炉運転圧で高効率の発電が可能である。このBWRの発電システムとしての特長は、安全設備設計にも生かされている。すなわち、BWRは圧力が低く、そして直接サイクルであるため、原子炉に直接注水することが容易であり、多種多様な注水手段を備えておくことが安全上の基本的な方策となる。

このBWRの特長を生かした安全上の方策をベースに、前章の安全対策の基本方針に基づく具体的な設備対応を以下に述べる。なお、ここではプラントの設備に影響する基本方針の第二の対応について主に述べる。

(1) 大規模な外的事象では、被害の大きさによっては初期対応の混乱が予想されることから、BWRの特長を生かした単純な対応操作である炉心への注水策を多様化する手段として、可搬式設備を準備することとした。また、この方策は単純な戦略であることから、安全対策の基本方針の第三で述べた、サイト外の支援チームと混乱時に協力するうえでも有効な対策となることが期待される。

(2) 可搬式設備を活用する場合には、外部からの接続および

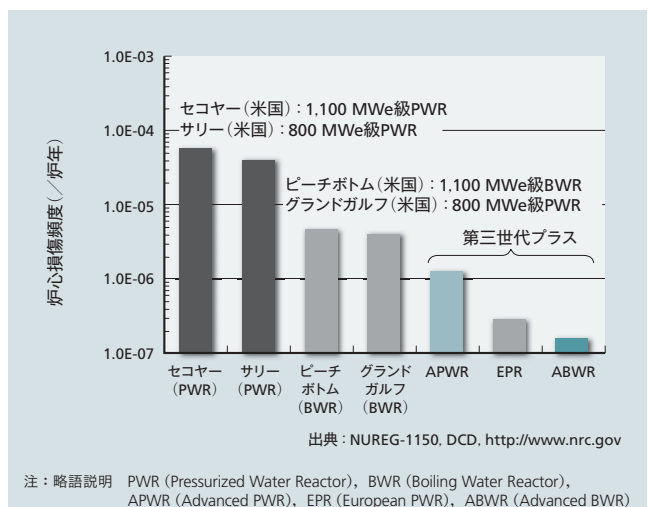
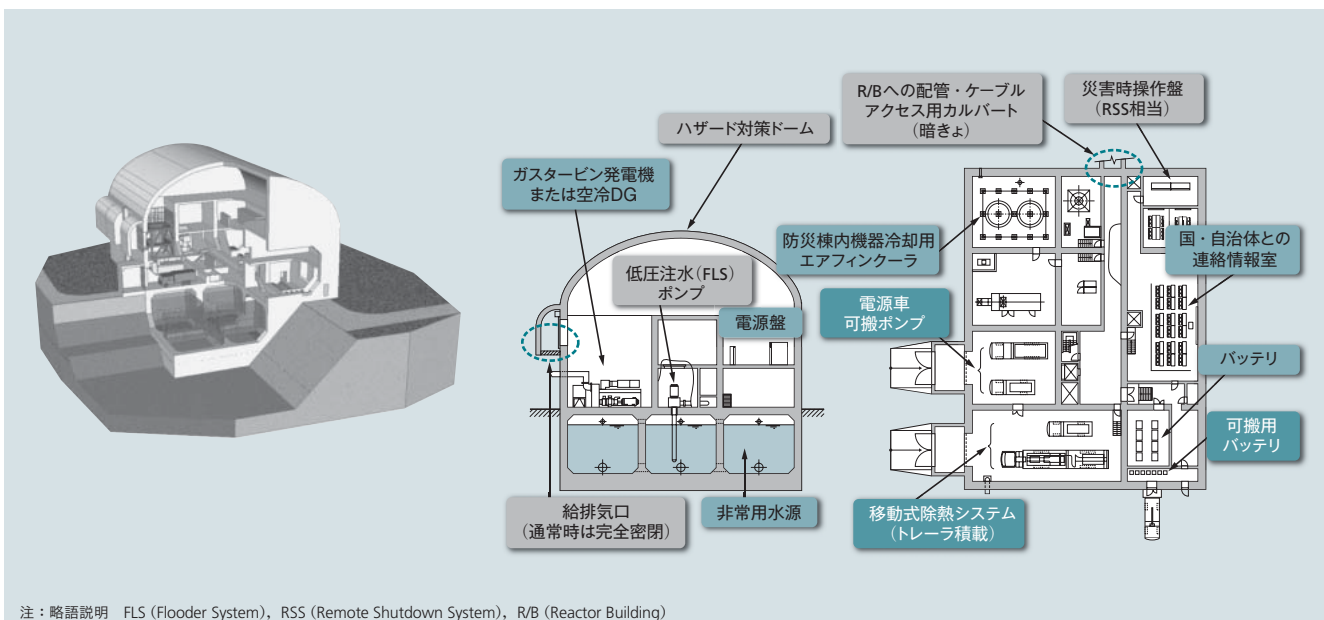


図2 | ABWRと世界の代表的な軽水炉の安全評価の比較
軽水炉 (BWR, PWR) の代表的なプラント、およびABWRを含む第三世代原子炉の内的事象に対する確率論的安全評価を示す。



注：略語説明 FLS (Flooder System), RSS (Remote Shutdown System), R/B (Reactor Building)

図3 | 防災棟の三次元イメージおよび代替電源と炉注水機能を備えた概念

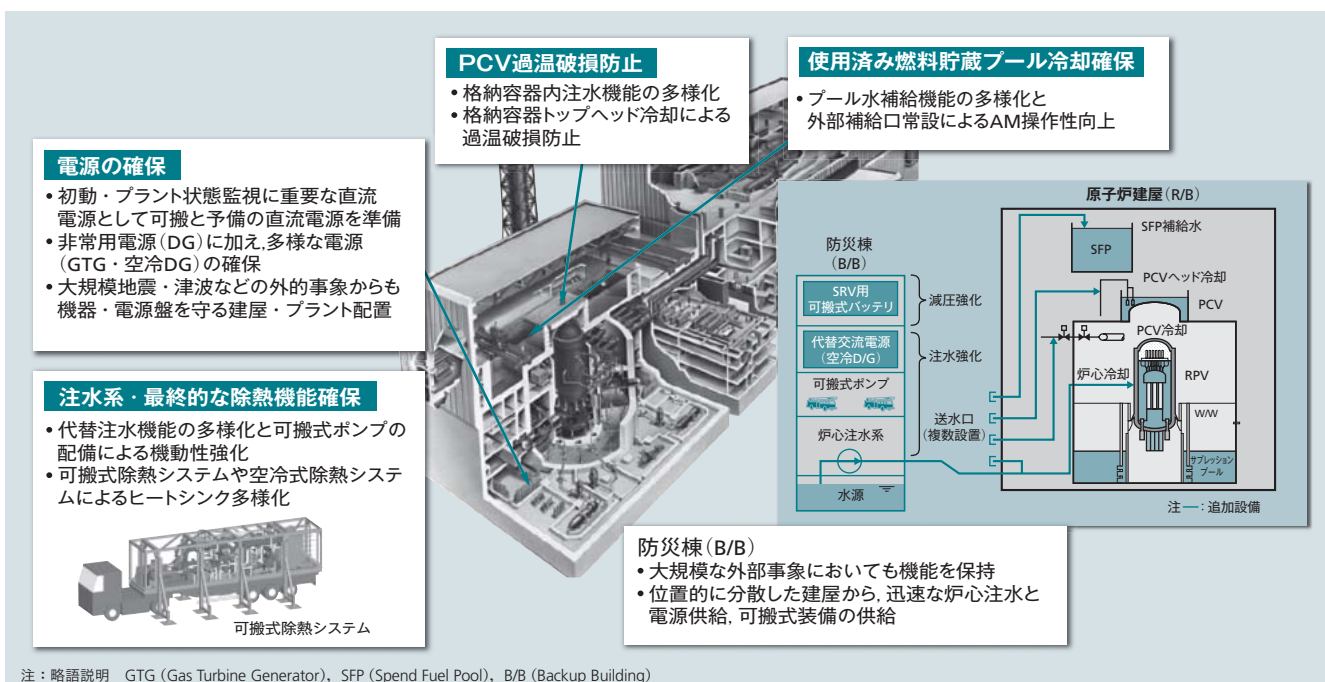
大規模な外部ハザードに対して設備機能を保持し、位置的に分散した建屋から迅速な炉心注水が可能になり、電源や可搬式装備を供給する防災棟概念を構築した。

び接近しての現場操作が重要である。そのため、柔軟性確保としては、外部の接続箇所を複数分散配置することを考慮した。

(3) 格納容器においては、非金属部の耐性向上として、原子炉格納容器内への注水策の多様化に加えて、格納容器トップヘッドに注水する設備を設けた。

(4) 以上の対策に加え、想定を超える事象に耐え、代替電源と炉注水機能を備えた防災棟概念を検討中である。この設備は、原子炉建屋とは独立して設置し、建屋には通常時

開口部をなくし、有事にのみ開放する手段を設けるなど、想定を超える事象においても機能を保持する概念である。常設の注水設備を原子炉建屋とは位置的に分散した場所に用意することで、速やかな注水を可能にする。さらに、AMに必要な予備品などの保管や災害時の前線基地としても有効な施設となることが期待される。この設備のイメージを図3に、ABWRの安全対策設備の全体概要を図4にそれぞれ示す。



注：略語説明 GTG (Gas Turbine Generator), SFP (Spent Fuel Pool), B/B (Backup Building)

図4 | ABWRの安全対策設備の概要

福島第一原子力発電所事故の経験と教訓から、地震や津波のような影響範囲の大きい外的事象に対して、これら外的事象の荷重から重要な安全設備を防護し、さらにそれらの防護が破られた場合にも可搬式設備などによる柔軟な対応が可能な安全対策設備を構築する。

4.2 既設国内プラントへの安全対策展開への方針

2011年7月、原子力安全・保安院から電気事業者に対し、福島第一原子力発電所における事故を踏まえた既設の発電用原子炉施設の安全性に関する総合評価、いわゆる「ストレステスト」の実施が指示された。日立グループは、安全裕度向上のため原子炉の代替冷却手段として使用する消火系配管などの耐震強化工事や配管貫通部の水密化工事、ならびに地震や津波に対する炉心損傷を防止できるクリフエッジ評価などで協力している。ストレステストの目的は、設計上の想定を超える外部事象に対する原子力発電所の要対策部を把握し、継続的な改善を行っていくことにある。これまでの評価で、今回の事故を受けてすでに実施済みの安全対策が効果的であることが示されている。日立グループとしても一連の評価を踏まえ、さらなる安全裕度向上対策を検討・提案していく。

一方、2012年3月、原子力安全・保安院は「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の技術的知見について」において、今後の規制に反映すべきと考えられる事項として「30項目の対策」を公表した。安全に対する基本的な考え方は前述の安全対策の基本方針と同様であり、日立グループとしても空気冷却式ディーゼル発電機システム、可搬式除熱システムなど安全対策のコンセプトを提案しており、現在、具体的な検討に取り組んでいるところである。

以上のように、既設国内プラントのさらなる安全裕度向上としては、前述の安全に対する基本的な考え方に基づいて既設プラントの個別の条件を勘案したうえで最適な安全裕度向上対策を立案・実行すること、また、その効果についてストレステストなどの手法によって定量的に評価し、抽出された要対策部で継続的な安全裕度向上を図っていくことが必要であると考えている。今後も日立グループの知見・経験を最大限活用し、引き続き取り組んでいく。

5. おわりに

ここでは、福島第一原子力発電所事故から得られる教訓に基づく安全対策の基本方針とABWRに適用する具体的な対策設備の概要、および既設国内プラントへの安全対策展開への方針について述べた。

今回の事故の教訓は、安全性向上の絶え間ない継続が必要であるということである。このためにも福島第一原子力発電所事故の教訓を生かし、さらに安全性を向上させた原子力発電プラントを提供していくとともに、既設プラントへの水平展開も踏まえ、より安全で信頼されるプラントの運転・建設に貢献していく。

参考文献など

- 1) 東京電力株式会社：福島原子力事故調査報告書（2012.6）
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120620j0303.pdf
- 2) 一般社団法人日本原子力学会原子力安全部会：福島第一原子力発電所事故に関するセミナー第4回「資料5 福島第一事故の教訓を反映した今後の安全確保の考え方」（2012.8）

執筆者紹介



松浦 正義

1987年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社日立事業所 原子力計画部 所属
現在、原子力プラントの安全高度化設計、次期・次世代炉の開発に従事
技術士（原子力・放射線部門）
日本原子力学会会員



久持 康平

1993年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社日立事業所 原子力計画部 所属
現在、原子力発電所の安全設計に従事
技術士（原子力・放射線部門、総合技術監理部門）
日本原子力学会会員



佐藤 深一郎

1987年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社原子力技術本部 原子力予防安全技術部 所属
現在、国内既設原子力発電所の予防保全プロジェクトに従事



守屋 公三明

1980年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社事業企画本部 所属
現在、BWR技術の改良、将来型BWRの開発に従事
日本原子力学会会員、日本物理学会会員