

特殊環境下で使用可能な監視システム高度化開発の現状

Status of R&D of High-performance Monitoring System under Sever Accident

日本原子力研究開発機構	土谷 邦彦	Kunihiko TSUCHIYA	Non-Member
日本原子力研究開発機構	武内 伴照	Tomoaki TAKEUCHI	Non-Member
池上通信機株式会社	駒野目 裕久	Hirohisa KOMANOME	Non-Member
助川電気工業株式会社	三浦 邦明	Kuniaki MIURA	Non-Member
日本原子力研究開発機構	荒木 政則	Masanori ARAKI	Non-Member
日本原子力研究開発機構	石原 正博	Masahiro Ishihara	Non-Member

Abstract

After the accident at the Fukushima Dai-ichi (1F) Nuclear Power Plant (NPP), the Japanese Government referred to “Enhancement of instrumentation to identify the status of the reactors and PCVs”, in the report of Japanese government to the IAEA ministerial conference in June 2011. Moreover, the Nuclear and Industrial Safety Agency gave the provisions, “Ensuring reliability of instrumentation during accidents” and “Enhancement of surveillance capability of the status of the NPPs”, in March 2012. In response to these provisions, the research and development of a monitoring system for NPPs situations during a severe accident started in November 2012. The R&D has been carried out following five-year plan from fiscal 2012 to 2016, and is composed of the three objectives, i.e., i) Radiation-resistant monitoring camera; ii) Radiation-resistant in-water transmission system; and iii) Heat-resistant signal cable. In this paper, the progress situations of above mentioned three items by the end of FY2015 is introduced.

Keywords: Nuclear Power Plant, Severe Accident, Radiation-resistant monitoring camera, Radiation-resistant in-water transmission system, Heat-resistant signal cable

1. はじめに

平成26年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」^[1]において、いかなる事態においても国民生活や経済活動に支障がないよう、エネルギー需給の安定に万全を期すという考え方が示されている。この方針のもと、まずは再生可能エネルギーや省エネルギーの最大限の拡大を図ることとされており、再生可能エネルギーの導入拡大やよりスマートなエネルギーマネジメント等への取組を進めるなかで、原子力発電所への依存度をできるかぎり低減していく方針が示されている。

一方、安全が確認された原子力発電所については重要な電源として活用する方針が示されている。既設の原子力発電所については、安全第一の原則に基づき、科学的な安全基準に基づく原子力規制委員会の専門的な判断を

尊重して、安全と認められた場合には再稼働を進めることとしている。原子力の安全確保は至上命題であることから、東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の経験や教訓を踏まえ、既設原子力発電所について、シビアアクシデント対策を中心に安全対策の高度化を適切に進めていくことが必要である。

そのため、原子力利用の安全を支える技術や人材を維持・強化していくことは喫緊の課題であり、安全を支える基礎基盤となる部分については、国が研究開発や技術基盤の整備を主導して進められている。

平成23年6月に取りまとめられた日本国政府報告書^[2]において、教訓14として「原子炉及び格納容器などの計装系の強化」が挙げられている。さらに、平成24年3月に当時の原子力安全・保安院が発表した「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」^[3]の中には、対策27「事故時における計装設備の信頼性確保」や対策28「プラント状態の監視機能の強化」が挙げられており、シビアアクシデントの発生時におけるプラント状態把握の重要性について指摘され、各種開発が

土谷 邦彦、〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002番地、日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 大洗研究開発センター 照射試験炉センター 照射試験開発課

進められていた。

一方、エネルギー基本計画では、過酷事故対策を含めた軽水炉の安全性向上に資する技術や信頼性・効率性を高める技術等の開発、高いレベルの原子力技術・人材の維持・発展等が必要であることが指摘されている。これを踏まえ、平成26年8月、総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会の下に「自主的安全性向上・技術・人材ワーキンググループ」が設置され、平成27年6月16日、国、事業者、メーカー、研究機関、学会等関係者間の役割が明確化された軽水炉安全技術・人材ロードマップが取りまとめられた^[4]。同ロードマップにおいては、システム・機器・構造の信頼性向上と高度化に係る取組の重要性が指摘されている。こうした背景を踏まえ、原子力発電所でシビアアクシデントが発生した際に、事象進展を迅速かつ確に把握するためには、プラント状態を監視し、状況を確認するための能力の向上を図ることが重要である。

本報告は、資源エネルギー庁の電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業「特殊環境下で使用可能な監視システム高度化」の一環として、低照度条件でも高解像度での撮影が可能な耐放射線性カメラ及び原子炉情報伝送システム（水中でも確実に信号を伝送できる無線システム及び過酷環境下における確実に炉内のデータを伝送できる計測線）の高度化に向けた技術基盤開発の現状についてまとめたものである。

2. 開発目標と計画

監視システム高度化開発の概要を図1に示す。耐放射線性カメラは原子炉建屋内、原子炉情報伝送システムは使用済燃料プールや原子炉压力容器を監視することを目的に、原子炉内で過酷事故が発生した際にも確実に監視し、データの伝送ができる基盤技術開発を行っている。

これらの基盤技術開発にあたっては、各々の技術の原子炉内での設置場所及び過酷事故が起こった際の使用環境の設定を行う必要がある。事故事象を想定した特殊環境条件の設定^[5]を表1に、各基盤技術の開発目標を表2に示す。例えば、耐放射線性カメラの開発については、原子炉建屋内監視のみならず、使用済燃料プール近傍やBWRの原子炉格納容器(PCV)内の監視ができる設定とした。原子炉情報伝送システムの内、無線伝送システムの開発については、主に使用済燃料プール内の計測データを伝送ができる設定とし、定常運転時のみならず、過酷事故

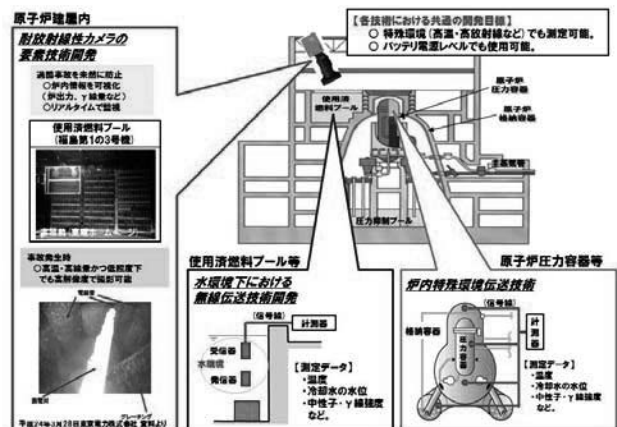


図1 監視システム高度化開発の概要

表1 事故事象を想定した特殊環境条件の設定

項目	場所	炉心内	使用済燃料プール	原子炉建屋内
使用環境	雰囲気	水中 大気中	水中	大気中
	最大温度	1000℃	100℃	100℃
	最大積算 γ線量	10 ⁸ Gy	10 ⁶ Gy	10 ⁴ Gy
	最大中性子束	10 ¹⁷ n/m ² /s	10 ¹⁴ n/m ² /s	10 ¹⁰ n/m ² /s
基盤技術の整備		・炉内特殊環境 伝送技術	・耐放射線性カメラの 要素技術 ・炉内特殊環境 伝送技術	・耐放射線性カメラの 要素技術 ・炉内特殊環境 伝送技術

表2 各基盤技術開発の目標

基盤技術課題	目標	目標の設定
(1) 耐放射線性カメラの要素技術	事故発生時の過酷環境下(高放射線下、電源喪失時の非常灯等の暗い照明下)でもプラント内部の状態が監視可能な耐放射線性カメラの要素部品を開発する。	既存の耐放射線性カメラと定義されるカメラの調査を行い、目標の積算線量(10 ⁶ Gy)まで使用可能な低照度・高解像度で使用可能なカメラの構成部品の要素技術開発を行う。開発した構成部品を用いて耐放射線性カメラの試作を行い、γ線環境下での性能を評価する。
(2) 原子炉情報伝送の要素技術 a. 水環境下における無線伝送技術	事故発生時の過酷環境下において、使用済燃料プールや炉心内の状況を把握するため、水中での計測値(温度、水質等)を無線で伝送する技術を開発する。	水環境下での無線伝送方法に関し、構成される要素部品の耐放射線性を調べ、技術開発課題を明確にする。これらの課題を克服したデータ伝送回路を開発し、過酷環境時の使用済燃料プールや炉心内の計測値のデータ伝送を要証するとともに、事故発生時の環境を想定したデータ伝送について評価する。
(2) 原子炉情報伝送の要素技術 b. 炉内特殊環境伝送技術開発	事故発生時の炉心近傍の過酷環境(高温・高放射線等環境)でもその機能を失わずに使用可能な信号線を開発する。	原子炉内に設置した計測器に用いる計測線に対し、炉心溶融を想定した環境での計測データ(温度、水位、圧力等)を正確に伝送可能な信号線を開発し、開発した計測線の高温(1000℃)・高放射線(10 ⁸ Gy)環境での特性を評価する。

が発生し、電源喪失が起こっても監視できるシステムとした。また、計測線については、BWRの原子炉压力容器内(RPV)やPWRの原子炉容器(RV)内の温度、圧力、水位等の計測データが炉心溶融時にも破損せず、監視できる計測線として、無機絶縁ケーブル(MIケーブル)を選定し、被

覆管や絶縁材の材料に与える計測値への評価を行い、より精度の高いデータを伝送できる設定とした。

本開発は、平成24年度から平成28年度の約5年間で、最初の3年間は各基盤技術の要素開発を、次の2年間は要素開発で得られた成果に基づいて、システム開発を行い、基本仕様を決定する計画である。基盤技術開発の進め方及び年度別計画をそれぞれ図2及び図3に示す。

3. 各基盤技術の成果概要

3.1 耐放射線性カメラの要素技術

過酷事故時に原子炉建屋内を監視するためには、低照度かつ高線量の環境下において映像を得ることの可能な耐放射線性の高いカメラの技術基盤の整備を行っている。まず、要素開発として、イメージセンサ構造評価用素子を試作し、この素子についてガンマ線照射試験を行い、素子の特性劣化等に対する影響を評価した。この結果、



図2 基盤技術開発の進め方



図3 基盤技術開発の年度別計画

放射線照射により映像が撮影できない原因が、暗電流の発生・増加であることを明らかにした。この、暗電流発生・増加は、イメージセンサ光電変換部分の構造であることが分った。特に、3Tr型の場合、ガンマ線により発生した水素イオンがフォトダイオード表面を活性化させ、特に周辺部では表面が空乏化することが原因であった。一方、4Tr型の場合、フォトダイオードの上面の厚い酸化膜中に正孔が発生すると、膜中の水素がイオン化し酸化膜中を拡散して、半導体界面に到達、界面の暗電流を抑えていた水素原子を奪って水素ガスとして放散し、界面が活性化することが原因と考えられる。また、表面P+層の電位がGND電位からプラスにシフトし、シールド効果による影響も考えられる。これらの照射試験結果により、耐放射線性に耐えうるイメージングセンサの基本構造を決定した。

耐放射線性カメラの光学系のうち、プリズム及びズームレンズの設計・試作及びガンマ線照射試験を行い、1000kGy以上でも使用可能であることを確認した。また、センサ回路及び高速画像処理回路についてのγ線照射試験もを行い、基本機能を有する回路の基本設計を完了し、1000kGyの耐放射線性を有するカメラの試作への見通しが得られた。

3.2 原子炉情報伝達の要素技術

(1) 水環境下における無線伝送技術

データ送受信の信頼性がより高い伝送システムを構築するための要素技術開発と技術基盤の整備を行っている。伝送システム送信機及び受信機の基本構造を設計し、構成部品のガンマ線照射試験を行い、実環境を模倣した水中伝送システムの基本設計・試作を開始した。一方、使用済燃料プール内にある使用済燃料の監視を行うため、使用済燃料から発光するチェレンコフ光の影響についても併せて評価した。

まず、2次元パターン信号に低速の点滅変調信号を重畳し、双方向制御が不要な環境ロバストな伝送システムの基本設計を行った。データ収集機能を備えた送信機は、複数のLEDを2次元マトリックス状に配列した構造とし、受信機はデジタルカメラとする構成とした。LEDは、表面実装型を選定し、ガンマ線照射による劣化を低減可能なものとした。表面実装型LEDのγ線照射試験の結果、1000kGyまで電流-電圧特性は未照射時と比較して有意な変化は無いこと、全光束の低減率も20%程度であること等を明らかにし、送信機の発光素子として使用できるこ

とを確認した。また、伝送システム送信機の構築のため、構成するA/D変換器、電源系等の照射特性も明らかにし、基本設計に反映した。また、送信機の伝送方式にはインターリーブ機能を付与し、受信機は高速スキャンによる画像乱れ低減機能及び二値化閾値調整機能を実装することで、使用環境で想定される水中の気泡、濁り、浮遊物を模擬した水中伝送試験において、安定した通信が可能であることを示した。

(2) 炉内特殊環境伝送技術

高温型MIケーブルについて、構成する芯線や絶縁材、被覆材といった部材について、過酷環境(高温、高圧、水、高放射線環境等)下を模擬した特性試験を実施し、過酷事故模擬環境下における信号線の電気的特性等に与える影響について評価した。

まず、軽水炉定常運転時における高温型MIケーブルの電気的特性及びMIケーブルに用いるシース材の機械的特性を調べた。その結果、定常運転時においては、製作したMIケーブルの電気的特性には問題なく、長期使用が可能であること、シース材(SUS316及びNCF600)の機械的特性には大きな問題ないことを明らかにした。また、過酷事故を想定した高温型MIケーブルの特性試験では、シース材をSUS316にした場合、シース材の割れ・破損が生じ、絶縁が劣化し、1000℃×3日間の使用が困難であることを明らかにした。さらに、過酷事故時では、窒素、酸素、水素、水蒸気のみならず、放射性核種としてI₂、Cs等が存在する。このため、より過酷事故環境条件に近い雰囲気(N₂、O₂、CO、H₂O、I₂等の複合雰囲気)における腐食試験を行い、SUS316とNCF600との間で、雰囲気による腐食挙動及び腐食速度の違いを明らかにし、腐食メカニズムの違いがあることが示唆された。

次に、高温型MIケーブルのガンマ線照射下における電気的特性を調べた結果、放射線による照射誘起伝導の絶縁抵抗への影響は約300℃までが大きく、過酷事故を想定した1000℃の温度では、絶縁抵抗低下による電気的特性への影響は温度に依存することを明らかにした。

4. おわりに

各基盤技術に係る要素開発が概ね完了し、システム開発として、各基盤技術に係る試作機を製作し、最終的な特性試験を実施している。得られた成果により、目標を

満足する基本仕様を確定していく予定である。

本研究開発にあたっては、電気事業者、企業、研究機関等の専門家・有識者で構成されている「計測・監視機器を用いた安全対策高度化専門部会」を設置し、得られた成果を審議し、過酷事故を想定した原子炉施設内への適用性など、幅広い情報収集を行いながら、実用化までの考え方等について議論するとともに、今後の対応に関する考え方を整理しながら開発を進めている。

謝辞

本研究開発は、経済産業省資源エネルギー庁からの受託事業として実施した「発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業(特殊環境下で使用可能な監視システム高度化)」の成果である。

参考文献

- [1] 平成26年4月11日閣議決定, エネルギー基本計画, http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/.
- [2] 原子力災害対策本部編, 原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書-東京電力福島原子力発電所の事故について-, http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_hokukusho.html.
- [3] 原子力安全・保安院編, 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, <http://www.meti.go.jp/press/2011/03/20120328009/20120328009.html>.
- [4] 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 自主的安全性向上・技術・人材ワーキンググループ編, 「原子力の自主的安全性向上の取組の改善に向けた提言」, 平成27年5月27日, http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denki_jigyuu/jishutekianzensei/report_001.html.
- [5] 日立GEニュークリア・エナジー株式会社, 株式会社東芝, 三菱重工業株式会社編, 「過酷事故用計装システムに関する研究(フェーズI) 概要説明資料」, SA計装開発情報:クラスC, 2012年5月, 資源エネルギー庁技術アイデア公募説明資料(平成24年6月29日), <http://www.enecho.meti.go.jp/notice/event/029/>.