

# 過酷事故環境用高温型MIケーブルの開発

## R&D of High-Temperature Resistance Type Mineral Insulated Cable for Sever Accident

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	柴田 裕司	Yuuji SHIBATA	Non-Member
助川電気工業株式会社	鬼澤 達也	Tatsuya ONIZAWA	Non-Member
日本原子力研究開発機構	中野 寛子	Hiroko NAKANO	Non-Member
助川電気工業株式会社	武野 尚文	Takafumi TAKENO	Non-Member
日本原子力研究開発機構	武内 伴照	Tomoaki TAKEUCHI	Non-Member
日本原子力研究開発機構	土谷 邦彦	Kunihiko TSUCHIYA	Non-Member

### Abstract

After the accident at the Fukushima Dai-ichi (1F) Nuclear Power Plant (NPP), 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, we have developed a high heat resistance and a high-temperature resistance type MI cable with radiation resistant as a cable for measurement in the nuclear reactor at the time of a sever accident (SA). We did the high toxicological test, the temperature rising test and the long hot heat-proof test which assumed the time of a SA for the metallic sheath material which are constituent materials and estimated the durability. As a result, we got the perspective which can develop the high heat resistance and a high-temperature resistance type MI cable which can also be used in 1000°C of temperature.

**Keywords:** Nuclear Power Plant, Severe Accident, High-Temperature Mineral Insulated Cable, 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」<sup>[1]</sup>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、エネルギー需給に万全を期す事が示されている。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事が示されている。

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、原子力規制委員会が科学的な安全基準に基づいて安全と認めた場合には再稼働を進める事としている。原子力の安全確保は至上命題であり、東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえ、シビアアクシデント対策として安全対策の高度化を進め、原子力発電所でシビアアクシデントが発生した時でも、事象進展を迅速かつ的確に把握する為に、プラント状態の監視能力を向上させることが重要である。

三浦 邦明、〒317-0051 茨城県日立市滑川本町3-19-5、助川電気工業株式会社 技術開発部  
E-mail: miura@net-sukegawa.com

本報告は、過酷事故環境下においても確実に炉内のデータを伝送できる計測線の開発の現状についてまとめたものである。

## 2. 炉内過酷事故環境用高温型MIケーブルの開発目標と計画

過酷事故環境下において利用する炉内計測線の概要を図1に示す。計測線は、BWRの原子炉圧力容器内(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、監視するものでなければならない。この炉内計測線の開発にあたっては、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。

事象を想定した特殊環境条件の設定を表1<sup>[2]</sup>に、炉内計測線に要求される想定事故及び製作条件を表2に、

その開発目標を表3に示す。計測線の開発目標は、表1に示した過酷環境でも、より精度の高いデータを伝送できるにすることである。

具体的には、耐熱性の高い無機絶縁ケーブル(MIケーブル)を選定し、放射線の影響を低減するために、放射化断面積が小さい材料で1000℃に耐え、水蒸気を伴う酸化雰囲気であつ核分裂物質の被毒にも耐える計測線であればならない。この計測線の開発計画を図2に示す。

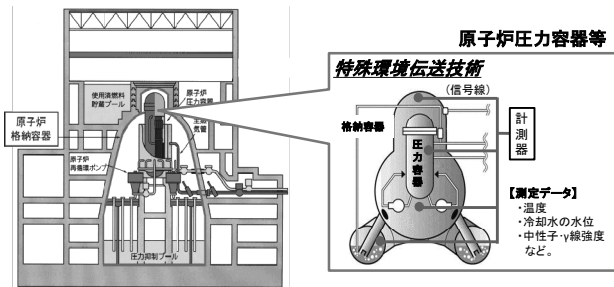


図1 開発する炉内計測線の概要

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 <sup>8</sup> Gy	10 <sup>6</sup> Gy	10 <sup>4</sup> Gy
	最大中性子束	10 <sup>17</sup> n/m <sup>2</sup> /s	10 <sup>14</sup> n/m <sup>2</sup> /s	10 <sup>10</sup> n/m <sup>2</sup> /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 炉内計測線に要求される想定事故及び製作条件

検討事項	過酷事故時の炉心内想定事象	計測線への影響	
温度	最大1000℃	シース材 絶縁材	機械的特性 電気特性(絶縁・導通)
雰囲気	冷却水 ・ECCSからの冷却(純水) ・海水注入 ・燃料破損による核分裂性物質の放出	シース材	機械的特性 両立性・被毒性 (海水、核分裂性物質など)
	大気露出 ・水蒸気、酸素、水素、窒素 ・燃料破損による核分裂性物質(ガス)の放出	絶縁材	シース材が破損した場合は、絶縁材の溶解性
放射線	中性子:10 <sup>17</sup> /m <sup>2</sup> /s γ線:10 <sup>8</sup> Gy	シース材	機械的特性
		絶縁材	電気特性(絶縁・導通)

表3 炉内計測線の開発目標

基盤技術課題	目標	目標の設定理由
(1) 原子炉情報伝送の要素技術 a. 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機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 <sup>8</sup> Gy)環境での特性を評価する。

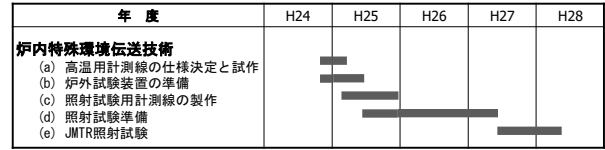


図2 基盤技術開発の年度別計画

### 3. 過酷事故環境用高温型MIケーブルの開発成果

#### 3.1 高温試験

過酷事故を想定した過程で、軽水炉内部が運転温度から1000℃までに注水による冷却と昇温を繰り返した場合、高温型MIケーブルの絶縁特性や導通抵抗等の高温特性がどのように変化するかを確認する試験を実施した。この試験に於いてシース材の酸化などの影響を無くし、高温型MIケーブルの絶縁特性や導通抵抗等の温度による影響を調べるため、真空中での昇降温試験を実施した。試験は、PWRの定常運転温度(325℃)から1000℃までの昇降温を繰り返した温度条件を設定した(図3参照)。325℃におけるMIケーブルの体積固有抵抗(絶縁抵抗)及び導通抵抗の測定結果を図4に示す。その結果、MIケーブル内の熱電対素線は断線も無く、絶縁抵抗は高く、導通抵抗も一定に維持されていることが分かる。

次に、MIケーブルを600~1000℃の高温大気中(湿度30~50%)に約15日間保持し、絶縁抵抗特性や表面状態の変化を調べた。その電気的特性結果を図5に示す。この結果、800℃以下の高温大気中では、SUS316及びNCF600シース材とも15日間の連続計測はできたが、1000℃でのSUS316シース材のMIケーブルは、約60時間から絶縁が低下し始め、約100時間で計測ができなくなった。

1000℃の高温大気中にMIケーブルを約15日間保持後のシース材の外表面写真を図6に示す。その結果、SUS316シース材は破損し、絶縁材が露出したため、計測不能となったものと考えられる。

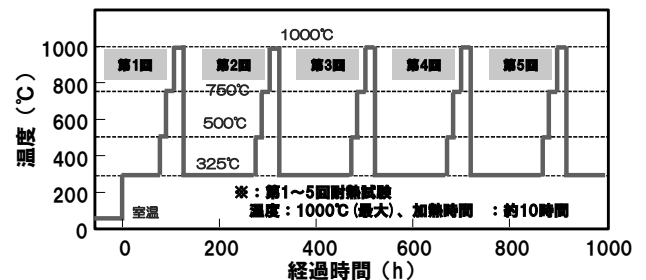


図3 真空中における昇降温試験の加熱条件

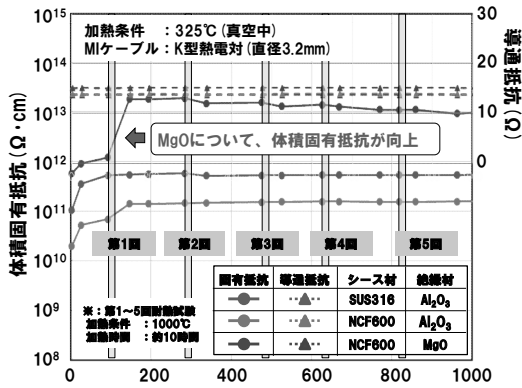


図4 真空中における昇降温試験の電気的特性結果

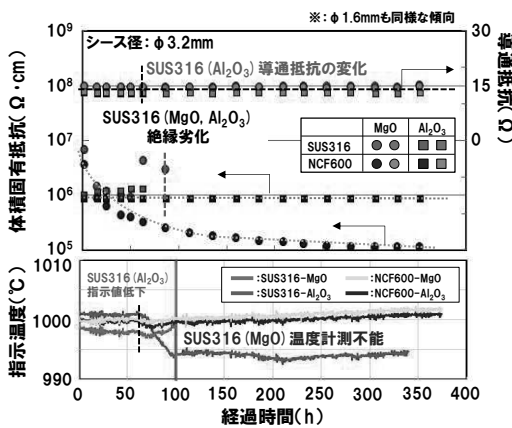


図5 大気中1000°Cの加熱試験中の電気的特性結果

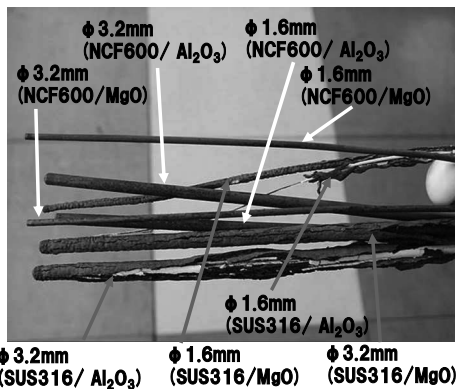


図6 大気中1000°Cの加熱試験後の外観写真

表4 SUS316とNCF600の酸化速度(1015°C)

項目	環境			
	Air	Air/H <sub>2</sub> O		
SUS316	酸化速度※ (mg/cm <sup>2</sup> /h)	2.4	6.9	
	破損予測日	φ1.6	77時間	27時間
		φ3.2	107時間	37時間
NCF600	酸化速度※ (mg/cm <sup>2</sup> /h)	0.6	1.6	
	破損予測日	φ1.6	325時間	122時間
		φ3.2	453時間	170時間

(※: 装置初期で算出した酸化速度)

水蒸気によるシース材(SUS316とNCF600)の酸化特性を明らかにするために、TG-DTA装置を用いて、酸化速度を評価した(表4参照)。試験条件は、20%O<sub>2</sub> 雰囲気と20%O<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O(90°C.D.P.)雰囲気とした。その結果、水蒸気の添加により酸化が増大すること、大気中1000°Cで酸化による破損が起こる可能性があることを明らかにした。

### 3.2 過酷事故環境用高温型MIケーブルの開発成果 (1) FPガス環境下の模擬試験

過酷事故時の雰囲気にはヨウ素(I<sub>2</sub>)やセシウム(Cs)等の核分裂生成物が含まれるため、シース材の被毒性(腐食)を調べた。試験に先立って、シース材とI<sub>2</sub>、CsI及びCH<sub>3</sub>Iの被毒性を評価した。その結果、I<sub>2</sub>ガスの被毒性が非常に大きいことから、模擬試験はI<sub>2</sub>で行った。まず、700°C×24時間、「空気+I<sub>2</sub>雰囲気(I<sub>2</sub>圧力54mmHg)」に暴露した結果、SUS316の腐食厚みは30~40μm、NCF600の腐食厚みは3μmであり、SUS316の被毒性が大きかった。

次に、過酷事故環境模擬条件として、「0.0017%I<sub>2</sub>+1.4%H<sub>2</sub>O+38.4%CO+2%O<sub>2</sub>(ベースガス:N<sub>2</sub>)」で行った。過酷事故環境模擬条件における腐食試験の概略図を図7に示す。SUS316及びNCF600の表面観察結果を図8に示す。この結果、SUS316表面の腐食生成物は剥離を観測したが、NCF600表面の腐食生成物は薄く、剥離はなかった。

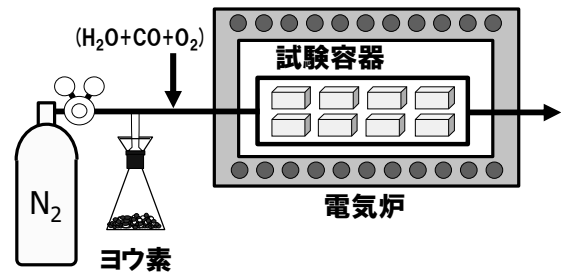


図7 過酷事故環境模擬条件における腐食試験の概略図

	ヨウ素単体条件	過酷環境模擬条件
SUS316	腐食生成物の剥離 	
NCF600		

図8 過酷事故環境模擬条件での外観写真

## (2) 放射線照射場での特性試験

ガンマ線照射下における絶縁材の照射誘起伝導を調べるために、Co-60 照射施設のホットセル内に試験装置を設置し、照射試験を行った。γ線照射試験の概略図（シース材の酸化防止の為、電気炉内部不活性ガス雰囲気）を図9に、その結果を図10に示す。この結果、放射線による絶縁抵抗への照射誘起伝導の影響は約 300°Cまでであり、過酷事故を想定した 1000°Cでは温度による絶縁抵抗の低下の寄与が大きいことを明らかにした。

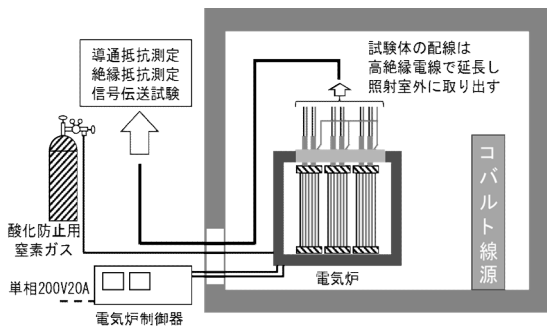


図9 ホットセル内γ線照射試験の概略図

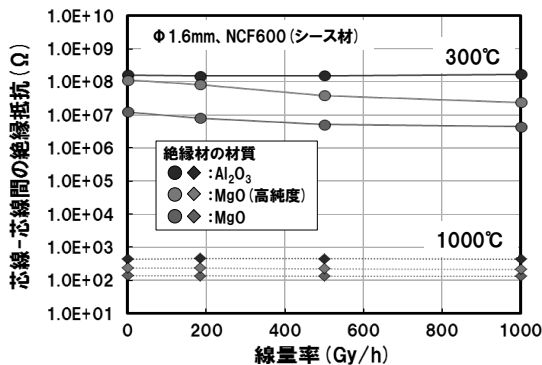


図10 γ線環境下における電気的特性結果

## 4. カタログ化へ向けた評価

MIケーブルを構成する芯線と絶縁材やシース材等について、軽水炉定常運転時から過酷環境(高温、高圧、水、高放射線環境等)を模擬した状態まで特性試験を実施し、過酷事故模擬環境下における信号線の健全性について、カタログ化へ向けた評価を行っている。その評価結果(中間まとめ)を表5に示す。

本報告では割愛したが、定常運転時においては、SUS316及びNCF600をシース材とするMIケーブルは問題なく、長期使用が可能であることが再確認できた。

一方、過酷事故を想定したMIケーブルの特性試験に

おいて、SUS316シース材は、割れ・破損が生じ、絶縁が劣化し、1000°C×3日間の使用が困難であることが明らかになった。一方、NCF600シース材は、過酷事故時の雰囲気について健全性を保ちシース材としての優位性が明らかになった。

表5 高温型MIケーブルのカタログ化へ向けた評価結果  
(中間まとめ)

試験条件	SUS316		NCF600		今後の検討課題
	シース材	絶縁材	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
定常運転状態 未照射時 ・BWR: 290°C × 8MPa ・PWR: 325°C × 15MPa	○	○	○	○	定常運転時の耐久性評価
事故発生時状態 未照射時 (~1000°C) ・真空 ・大気中 ・大気中 (水蒸気 + 空気) ・大気中 (複合環境)	○	○	○	○	計測機器の計測値への影響評価 ・高温時における送受信電圧・電流の影響 シース材の選定仕様の決定 ・表面酸化によるシース材の破損 ・放射線ガス (I <sub>2</sub> ) の影響評価
γ線照射時 (~1000°C) ・不活性ガス	○	○	○	○	

## 5. おわりに

NCF600をシース材とするMIケーブルが、過酷事故環境でも使用できる高温型MIケーブルとして、提案できる見通しが得られ、今後カタログ化へ向けた仕様についてまとめていく予定である。

## 謝辞

本研究開発は、経済産業省資源エネルギー庁の受託「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)」の成果であり、関係各位に感謝します。

## 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/](http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/).
- [2] 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>.