

原子力発電所におけるケーブル故障の傾向分析

Trend Analysis of Cables Failure Events at Nuclear Power Plants

伏見 康之 (Yasuyuki Fushimi) *

要約 原子力安全システム研究所の原子力情報データベースに登録されている海外原子力発電所不具合事象から、海外のケーブル故障について、152件を抽出し、故障の発生状況別、故障原因別等の分類を行った。また国内原子力発電所のケーブル故障について、原子力施設情報ライブラリーから、15件を抽出し、海外と同様の分類を行った。両者の傾向を比較した結果、以下が判明した。

- 1) 海外と比べ国内ではケーブル絶縁体の不具合発生割合が低い。その理由として国内では広範に劣化診断が行われていることが考えられる。
- 2) 作業中のケーブル故障のうち、海外では埋設ケーブルの占める割合が高い一方で、国内では発生していない。国内では掘削作業に先立ち十分に事前調査を行っていることが考えられる。
- 3) 供用中のケーブル損傷では、海外に比べ国内では経年劣化の割合が少なく、保守不良の割合が多い。保守不良を低減させるためにも保守員の技能向上が望まれる。

キーワード 原子力発電所、事故・故障、傾向分析、ケーブル、運転経験情報

Abstract In this study, 152 failure events related with cables at overseas nuclear power plants are selected from Nuclear Information Database, which is owned by The Institute of Nuclear Safety System, and these events are analyzed in view of occurrence, causal factor, and so on. And 15 failure events related with cables at domestic nuclear power plants are selected from Nuclear Information Archives, which is owned by JANTI, and these events are analyzed by the same manner. As a result of comparing both trends, it is revealed following;

- 1) A cable insulator failure rate is lower at domestic nuclear power plants than at foreign ones. It is thought that a deterioration diagnosis is performed broadly in Japan.
- 2) Many buried cables failure events have been occupied a significant portion of cables failure events during work activity at overseas plants, however none has been occurred at domestic plants. It is thought that sufficient survey is conducted before excavating activity in Japan.
- 3) A domestic age related cables failure rate in service is lower than the overseas one and domestic improper maintenance rate is higher than the overseas one. Maintenance worker's skill improvement is expected in order to reduce improper maintenance.

Keywords nuclear power plant, trouble and incident, trend analysis, cable, operating experience

1. はじめに

近年原子力発電所の供用期間に関係なく、一定の安全水準を確保することを目的として、プラントの長期間の供用に伴う経年劣化の特徴を把握し、これに的確に対応した保守管理を行うための高経年化対策の検討が開始されている。この高経年化対策上考慮すべき経年劣化事象の一つとしてケーブルの絶縁劣化が取り上げられており⁽¹⁾、ケーブルの保守管理が重要視されてきている。過去に原子力安全システム研究所（以下「INSS」という）でも低圧ケーブルに着目して劣化診断技術の研究を行っている⁽²⁾。

また従来からINSSでは海外原子力発電所における運転経験情報のうち不具合情報を収集し、その情報で述べられている事象を分析し、そこから得られる教訓より国内PWR電力に対策を必要とする項目があれば、改善対策提言を行っている⁽³⁾。本分析では、前述の不具合情報の分析過程において、海外原子力発電所で発生した不具合情報で構築した原子力情報データベースに蓄積されているケーブル故障と、国内で発生したケーブル故障に着目し、それぞれの故障発生傾向の分析と比較を行うことにより、ケーブルの保守管理上、国内PWR電力に教訓と成り得る項目の抽出ができないか、検討を行った。

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現在 関西電力(株)

2. 海外ケーブル故障の調査

2.1 分析対象とその抽出（海外）

INSS で構築している原子力情報データベースには、1994 年以降に発行された米国原子力発電運転協会 (Institute of Nuclear Power Operation : 以下 INPO)、世界原子力発電事業者協会 (World Association of Nuclear Operators : 以下 WANO) の運転経験情報、および米国原子力規制委員会 (NRC) の Event Notification Report, Licensee Event Report, 2001 年以降に発行された仏国 ASN (Autorité de sûreté nucléaire) の MAGNUC 情報を登録している。このうち、INPO, WANO の情報は非公開情報であり、会員間の情報交換、共有を目的として作成・発行されている。一方、米国 NRC の Event Notification Report, Licensee Event Report, 仏国 ASN の MAGNUC 情報等は公開情報であり、一定の基準を超える事象が発生した場合に、公衆へ通知することを目的として作成・発行されている。

本研究では、原子力情報データベースに登録している 1997 年から 2006 年の 10 年間に海外原子力発電所で発生した不具合事象で、その情報にケーブルもしくは配線と記載されている事象を抽出し、その中から、発電所内で使用されているケーブルの物理的損傷や劣化により、その機能を喪失した事象を選定した。ただし作業等により接続を間違えた場合はケーブル本来の機能を喪失したわけではないので対象から除外した。

1997 年から 2006 年の間に発生した不具合事象 26,061 件を調査した結果、152 事象 (2007 年 1 月 23 日時点) を抽出した。

2.2 故障形態別の分類（海外）

海外のケーブル故障 152 件を、故障形態別に分類した。分類結果を図 1 に示す。

絶縁体に関する不具合 (地絡, 短絡, 絶縁低下) が 92 件 (61%) と多く、導体に関する不具合 (断線, 抵抗過大, 導通不良) が 50 件 (33%) を占める。

これを使用されている電圧により、送電ケーブル (6kV 以上)、動力ケーブル (100V ~ 6kV)、計装・通信ケーブル (100V 以下) それぞれで、故障形態別に分類した。分類結果を図 2 に示す。これらを比

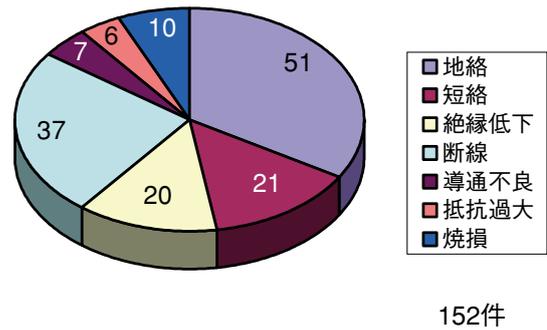


図 1 ケーブル故障形態別分類 (海外)

較すると、送電ケーブルでは地絡, 短絡および絶縁低下を合わせた絶縁体に関する不具合が 17 件 (85%) と大部分を占めるのに対し、動力ケーブルで 57 件 (57%)、計装ケーブルで 18 件 (56%) とケーブル全体 (図 1) の割合とほぼ同じである。また、断線, 抵抗過大および導通不良を合わせた導体に関する不具合の割合が送電ケーブルで 1 件 (5%) と非常に少ないのに対し、動力ケーブルで 36 件 (36%)、計装ケーブルで 13 件 (40%) と、ケーブル全体 (図 1) の割合とほぼ同じであることがわかる。

送電ケーブルにおいては動力ケーブル, 計装ケーブルと故障形態の発生傾向が異なっている。これは使用している電圧が高いため、絶縁体のわずかな劣化であっても、絶縁体に関する不具合の顕在化しやすいことが考えられる。次に動力ケーブル, 計装ケーブルで故障形態の内訳を詳細に見ると、絶縁体に関する不具合のうち動力ケーブルでは地絡, 短絡

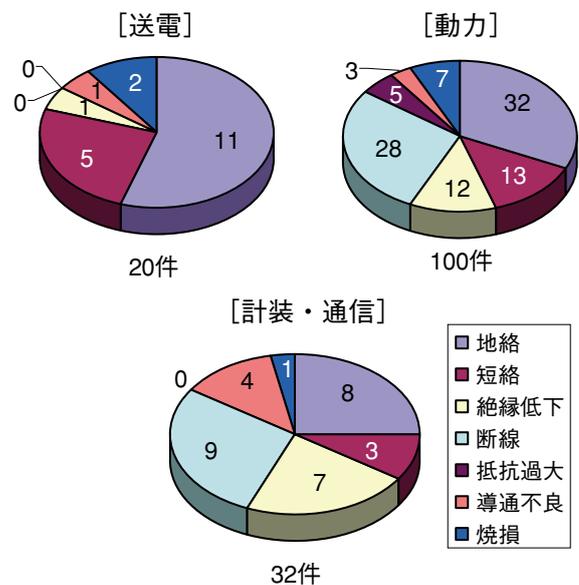


図 2 ケーブル種類毎の故障形態別分類 (海外)

を合わせると全体の45件(45%)を占めているのに対し、計装ケーブルでは11件(34%)とその割合が低下し、絶縁低下で動力ケーブルでは12件(12%)、計装ケーブルでは7件(22%)とその割合が逆転していることがわかる。これは使用目的によって不具合として顕在化する内容が動力ケーブルでは短絡、地絡であり、計装ケーブルでは絶縁低下と異なっていることが考えられる。

2.3 故障の発生状況 (海外)

海外のケーブル故障152件を、ケーブル故障の発生または発見された状況で分類した。分類結果を図3に示す。供用中に劣化もしくは損傷の判明した事象が93件(61%)と多く、作業中の損傷が47件(31%)となっている。このうち作業中の損傷に着目すると、47件のうち埋設(地中)ケーブルが19件(40%)と多くを占める。当該ケーブルが図面に示されていない、または図面を利用しなかったためケーブルを損傷させる事例が目立つ一方で、事前にその存在を認識していたにもかかわらず、まだケーブルまで到達しないと過信して作業に慎重を期さなかったため損傷させた事例も発生している。一方供用中の劣化・損傷のうち、埋設(地中)ケーブルの故障事例は92件中8件と少ない。

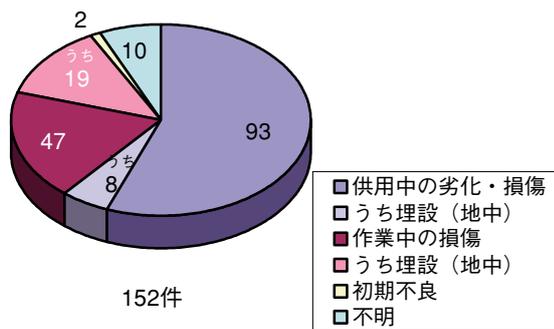


図3 ケーブル故障の発生状況 (海外)

2.4 供用中の劣化・損傷原因 (海外)

供用中にケーブルが劣化・損傷した事象93件の原因を分類した。分類結果を図4に示す。経年劣化が35件と38%を占め、元来の施工が悪く、発熱や周囲との摩擦等により劣化が加速されたような施工不良が26件(28%)と多い。次いで、元来の設計が悪く(過大な振動、不適切な材質選定、不適切な雰囲気想

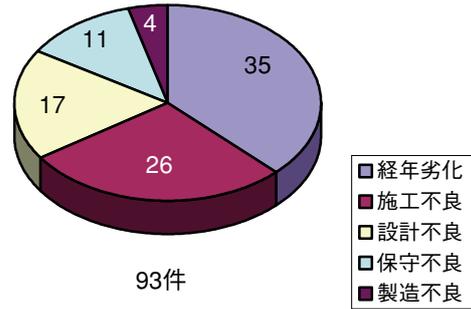


図4 供用中のケーブル劣化・損傷原因内訳 (海外)

定、等)故障に至った設計不良が17件(18%)と続く。解結線の繰り返し等に伴い劣化が加速されたような保守不良は11件と12%程度である。保守不良の占める割合が少ないことを考慮すると、海外のケーブルはあまり保守されていないことが伺える。なお埋設ケーブルの故障原因は、ほとんどが経年劣化であった。

2.5 作業中の損傷原因 (海外)

作業中のケーブル損傷事象47件の原因を分類した。分類結果を図5に示す。保守業者過誤(例:うっかり、まだ大丈夫と過信)が22件(47%)と半数近くを占め、次いで保守計画不良(例:事前調査不十分、図面にない)19件(40%)、施工不良(例:図面と異なった位置に施工)5件(11%)の順に多い。また埋設ケーブルに着目すると、保守計画不良19件中14件であり、先にも触れたように図面に示されていない、または図面を利用しなかったことに起因する不具合が多い。掘削を行う場合は、事前の周知な作業準備、調査が重要であることがわかる。なお残りの埋設ケーブル損傷事象は保守業者過誤

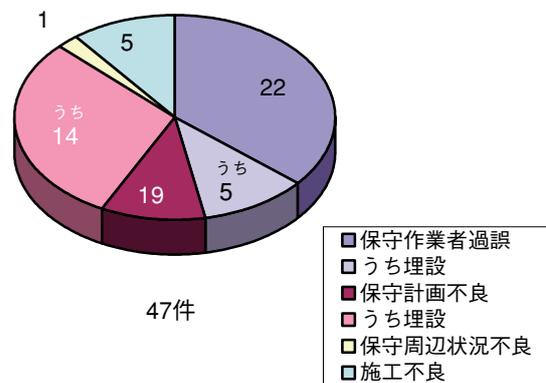


図5 作業中のケーブル損傷原因内訳 (海外)

22 件中 5 件に含まれている。

2.6 経年劣化を原因とする故障発生までの年数

供用中のケーブル劣化・損傷事象のうち、原因を経年劣化とする 35 件が供用開始から何年目に故障しているかを分類した。分類結果を図 6 に示す。明確に年数がわからない場合は、プラント運転開始から故障発生時点までの年数で代用した。熱劣化、水トリー劣化^{*}、放射線劣化のいずれにも属さない経年劣化をその他経年劣化として分類した。設置から 11 年を超えると経年劣化が発生し、21～25 年で 10 件と

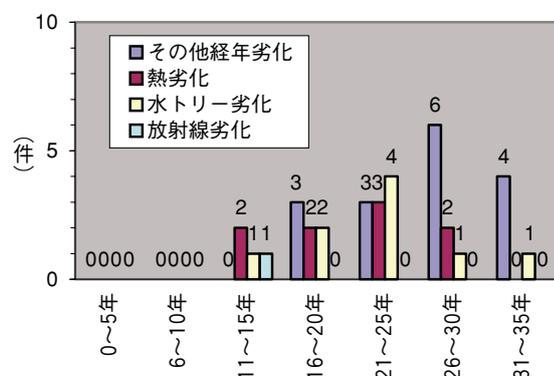


図 6 故障発生年数別分類

最も発生件数が多く、次いで 26～30 年で 9 件と多くなっている。放射線劣化 (15 年)、熱劣化 (平均 21 年)、水トリー劣化 (平均 22.2 年) は、その他経年劣化 (平均 26.4 年) と比べそれぞれ劣化の加速されていることがデータの上から読み取ることができる。なおその他経年劣化で最も発生早い事象では、16 年であることから、未点検のケーブルに対しては使用環境にもよるが 16 年を経過した辺りから点検を行うことが望ましいと考えられる。

3. 国内ケーブル故障の調査

3.1 分析対象とその抽出 (国内)

国内事象の抽出には、原子力施設情報公開ライブラリー (NUCIA) (4) を活用した。対象は海外と同様に過去 10 年間 (1997 年～2006 年) のケーブルの物理的損傷や劣化による機能喪失事象として、その情報に発電所内で使用されている「ケーブル」もしくは「配線」と記載されたものを検索して、該当した約 200 件のうち、その内容から 15 件を抽出した (2007 年 1 月 24 日現在)。抽出した事象のリストを表 1 に示す。

表 1 ケーブル故障リスト (国内)

No.	事象発生日	ユニット	件名
1	1997.01.10	福島第二 1 号	タービン建屋排気ファン用ケーブルの不具合について
2	1997.02.07	大飯 1 号	B - 非常用ディーゼル発電機潤滑油プライミングポンプの不具合について
3	1998.07.12	高浜 1 号	A 高感度型主蒸気管モニタの検出器温度補償系の不調について
4	1999.07.28	柏崎刈羽 7 号	原子炉再循環ポンプ 1 台停止に伴う原子炉手動停止について
5	2000.04.29	美浜 2 号	発電機励磁装置故障による発電機自動停止について
6	2000.06.08	福島第二 1 号	可燃性ガス濃度制御系ブロワ (B) の過負荷トリップについて
7	2001.10.09	敦賀 1 号	原子炉保護系チャンネル A スクラムについて
8	2001.11.18	福島第二 1 号	「主蒸気管トンネル漏洩」警報発生について
9	2002.03.08	福島第二 2 号	D / G2A ガバナ内部電線の不具合について
10	2004.12.15	敦賀 2 号	中性子源領域モニタの 1 チャンネル動作不能について
11	2004.12.17	敦賀 1 号	高圧注水系の待機除外について
12	2004.12.23	福島第一 3 号	起動領域中性子束モニタの指示変動について
13	2005.02.14	大飯 4 号	A 高低圧注入系の不具合について (A 高圧注入ポンプ燃料取替用水ピット側入口電動弁の地絡)
14	2005.10.06	柏崎刈羽 5 号	主蒸気逃がし安全弁の表示ランプの電気回路の点検について
15	2006.03.03	高浜 4 号	格納容器高レンジエリアモニタの指示値漸増について

* 絶縁体に何らかの要因で浸入した水分により、絶縁体が樹枝状に破壊される劣化現象

3.2 故障形態別の分類（国内）

海外と同様に、ケーブル故障 15 件を故障形態別に分類した結果を図 7 に示す。海外と比べ、導体に関する不具合（断線、導通不良など）が多く（47%：海外 33%）、絶縁体に関する不具合（地絡、短絡、絶縁低下）が少ない（33%：海外 61%）。この理由として国内では海外と比べケーブル絶縁体の劣化診断が広範に行われ、不具合発生の未然防止につながっていると考えられる。

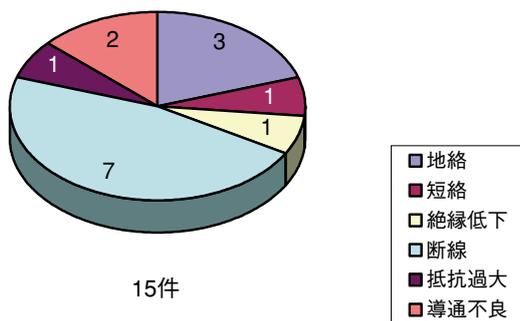


図 7 ケーブル故障形態別分類（国内）

3.3 故障の発生状況（国内）

海外と同様にケーブル故障の発生または発見された状況を分類した。分類結果を図 8 に示す。国内では海外と比べ、供用中の劣化・損傷が 12 件（80%：海外 61%）と多数を占め、作業中の損傷が 2 件（13%：海外 31%）と少ない。また海外と異なり、埋設ケーブルの劣化・損傷はなかった（0%：海外 18%；作業中に限定すると 40%）。以上より、海外と比較して国内では掘削を含む作業前に事前の調査を十分に行っていることや、周到な点検計画の立案とその実施が想定される。

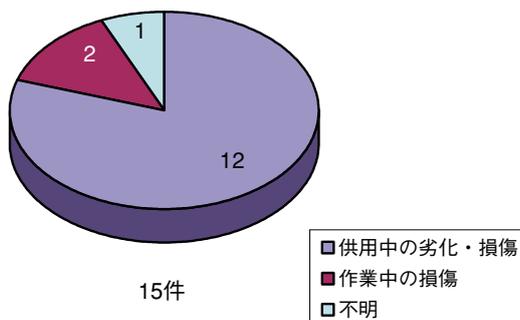


図 8 ケーブル故障の発生状況（国内）

3.4 供用中の劣化・損傷原因（国内）

供用中の故障 12 件の原因を分類した。分類結果を図 9 に示す。海外と比べ、経年劣化が 3 件（25%：海外 38%）とその割合が少なく、保守不良が 7 件（58%：海外 11%）とその割合の多いのが特徴的である。経年劣化の割合が少なく、保守不良の割合が多い要因として、海外と比べて国内ではケーブルに対して計画的な点検や交換を数多く実施して保守頻度の高いことが考えられる。保守不良の例として解結線の繰り返しに伴う端子ネジの摩耗に起因した損傷があり、いわゆる「いじり壊し」が発生している可能性も否定できない。保守不良を低減させるためには、保守員のさらなる技能向上が望まれる。

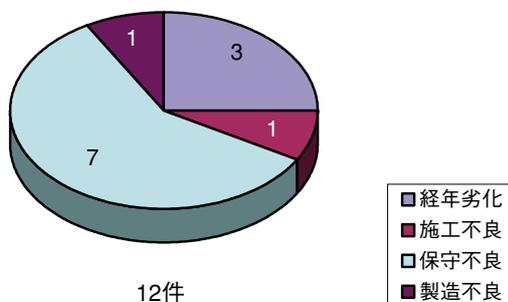


図 9 供用中のケーブル劣化・損傷原因内訳（国内）

4. まとめ

- （1）ケーブル故障形態のうち、海外に比べて国内は絶縁体に関する不具合の発生割合が低い。これは国内ではケーブル絶縁体の劣化診断が広範に行われ、不具合発生の未然防止につながることが考えられる。
- （2）作業中のケーブル故障のうち、海外では、埋設ケーブルの故障の占める割合が高い。一方国内では作業中の埋設ケーブル故障は発生していない。国内では、掘削作業に先立ち綿密な作業計画のもと、十分な事前調査が行われていることが考えられる。
- （3）供用中のケーブル劣化・損傷の原因内訳は、海外と比べ国内は経年劣化の割合が低い一方で、保守不良の割合が高い。国内ではケーブルの計画的な点検や交換を数多く実施していることが伺える一方で、保守不良を低減させるためにも保守員のさらなる技能向上が望まれる。

文献

- (1) 経済産業省 原子力安全保安院, 「実用発電用原子炉施設における高経年化対策の充実について」(2005).
- (2) 三上雅生, 「シリコンゴム絶縁低圧電気ケーブルの劣化診断手法の評価」, INSS JOURNAL, Vol.12, p.139 (2005).
- (3) 宮崎孝正他, 「海外原子力発電所における不具合事象の傾向分析(2004年)」, INSS JOURNAL, Vol.12, p.82 (2005).
- (4) 日本原子力技術協会, 原子力施設情報公開ライブラリー, <http://www.nucia.jp/> (2007年1月24日現在).