

日米の原子力発電所における
火災傾向に関する研究

5105010 稲垣宙伸

1. 序論

1.1. 研究背景

近年、中国やASEAN諸国など高い経済成長を遂げている国々を含む東アジア地域では、エネルギー需要が急速に伸びている。さらには世界的な環境問題・省エネルギー化の動向により、原子力発電所設備の推進は加速度を増していくものと考えられる。

また原子力発電所では火災により重大な事故に至ることはないが、間接的には電気ケーブルの損傷による計測制御の欠落、機器の誤作動や電源の喪失等により重大な事故に発展する可能性がある。

より安全で安心できる社会を構築するためには、重大な事故が発生してから対策を講じるのは許されず、さらには近年の発展途上国における原子力発電所設備の推進に伴い火災リスクの増加が推定される。以上から今後の原子力発電所における火災リスクの抑制が重要であることは明らかである。

1.2. 研究目的

本研究では、日本と米国における原子力発電所の火災事象について傾向分析を行い、今後の火災防護上教訓となるものはないか検討することを目的とする。特に下記の3項目を詳細に分析し日米を比較検討した。

(1)火災発生件数

(2)出火原因

(3)火災発生時のプラント運転状況と運転中プラントへの影響

また一般公開されている情報源からどこまでの分析が可能であるか検討し、情報の提供ならびに共有の重要性を考察することも目的の一つである。

2. 原子力発電所の基本事項

2.1. 原子力発電所の種類¹⁾

2.1.1. 加圧水型原子炉（PWR）

普通の水を減速材^{註1)}と冷却材として用いる軽水炉の一種で、現在世界で最も多い型式の原子力発電用の原子炉である（PWR：Pressurized Water Reactor）。加圧水型原子炉は、一次系に約160気圧の圧力をかけて、高温の一次冷却水が沸騰しないようにし、この熱を蒸気発生器^{註2)}に通して二次系の水に伝え、蒸気を作ってタービンを回して発電する。一次系と二次系が分離されているので、タービンを通る二次系の蒸気には放射性物質を含まない点が沸騰水型原子炉（BWR）と異なる。

註1) 減速材

減速材とは、中性子のエネルギーを吸収し、スピードを遅くするための役目をもった物質のことをいう。中性子は、水素元素などの質量数の小さい原子核と衝突することによってスピードを下げることができ、軽水炉では減速材として軽水（普通の水）が使用されている。

註2) 蒸気発生器

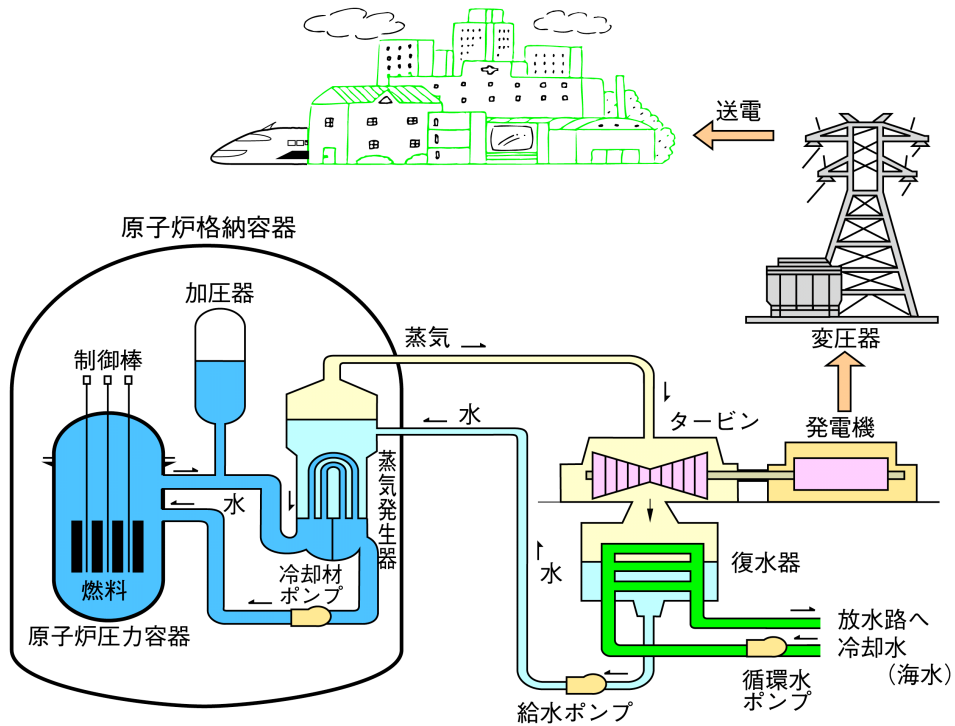
蒸気発生器とは、加圧水型軽水炉などに用いられている蒸気を発生させる装置のことであり、これは一種の熱交換器で、3000～4000本の細い伝熱管の内側を一次冷却水が流れ、外側を流れる二次冷却水に熱を伝えて水蒸気を作り、この蒸気がタービンを回して発電する。伝熱管にはニッケル合金が使われているが、伝熱管の腐食や亀裂が多く出たので、材料の改善や蒸気発生器の設計の改良がなされている。

2.1.2. 沸騰水型原子炉（BWR）

原子炉の冷却水を直接沸騰させてできた蒸気をタービンに送り、発電する型の発電用原子炉を沸騰水型原子炉（BWR：Boiling Water Reactor）という。構造は簡単であるが、タービンにはごく少量の放射性物質を含んだ蒸気が送られることになる。原子炉内の圧力は約70気圧、温度は約285℃の高温の蒸気を作り出している。

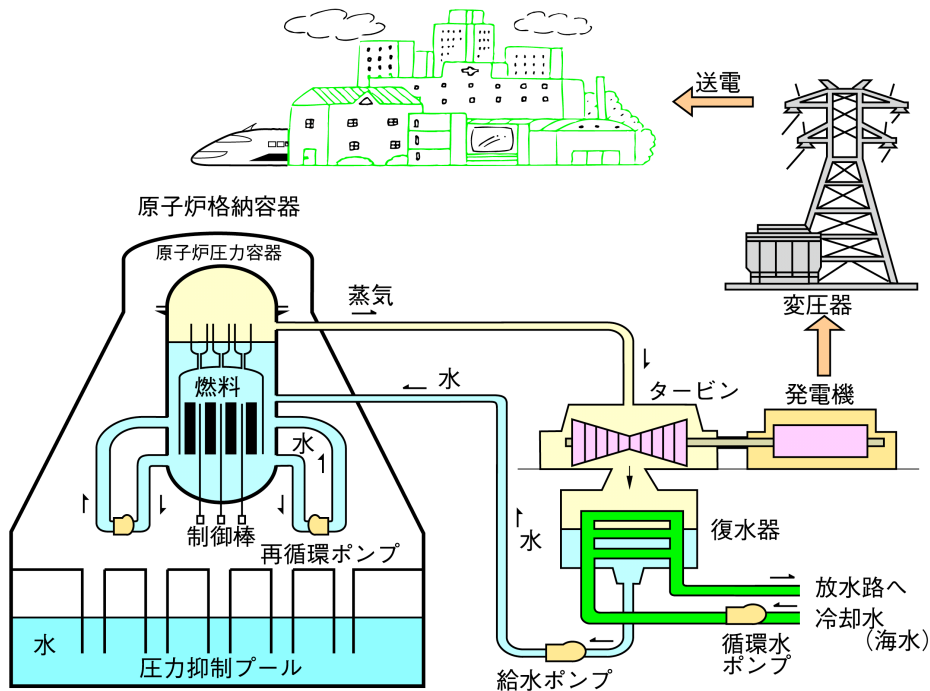
次項では加圧水型原子炉（PWR）、沸騰水型原子炉（BWR）のしくみをそれぞれ示す。

加圧水型炉(PWR)原子力発電のしくみ



出典：資源エネルギー庁「原子力2007」

沸騰水型炉(BWR)原子力発電のしくみ



出典：資源エネルギー庁「原子力2007」

2.2. プラント数

2.2.1. 運転中プラント数の年別推移

日米における運転中プラント数の年別推移を図-2-1、日米における原子力発電所の一覧とそれぞれの炉型、運転年数、運転開始年、運転終了年をまとめたものを表-2-1、表-2-2に示す。

まずはじめに日本について、国内初の商業用原子力発電所は1963年から開始し、その後3基の原子炉閉鎖を経ながらも発電所数は右肩上がりに増加している。そして2006～2009年現在では、日本における原子力発電所の歴史上最も多い55基が運転中であり、4基が建設中の状況である。

次に米国について、国内初の商業用原子力発電所は1957年から開始し、1990年、1991年には過去最大である112基もの原子力発電所が運転していた。そして1998～2009年現在では29基の原子炉閉鎖を経て104基が運転中であり、1基が建設中の状況である。

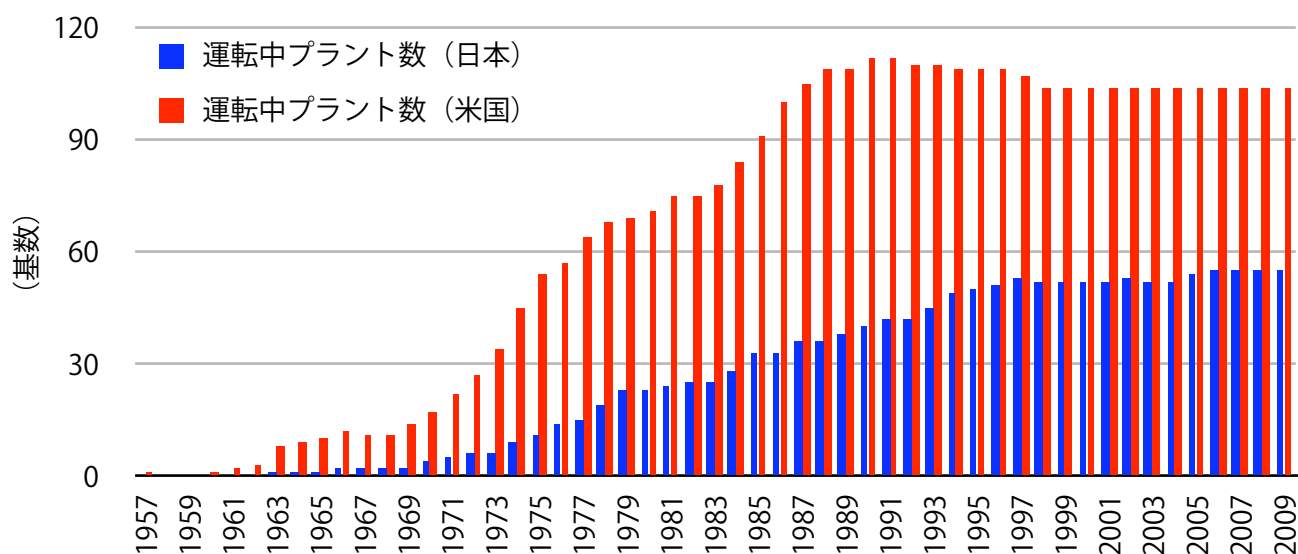


図-2-1 運転中プラント数の年別推移

表-2-1 日本原子力発電所一覧³⁾

プラント名	炉型	運転状況	運転年数	運転開始 (年)	運転終了 (年)
ふげん	ATR	廃炉	24	1979	2003
もんじゅ	FBR	建設	0	---	---
伊方1号	PWR	運転	32	1977	---
伊方2号	PWR	運転	27	1982	---
伊方3号	PWR	運転	15	1994	---

プラント名	炉型	運転状況	運転年数	運転開始 (年)	運転終了 (年)
玄海1号	PWR	運転	34	1975	---
玄海2号	PWR	運転	28	1981	---
玄海3号	PWR	運転	15	1994	---
玄海4号	PWR	運転	12	1997	---
高浜1号	PWR	運転	35	1974	---
高浜2号	PWR	運転	34	1975	---
高浜3号	PWR	運転	24	1985	---
高浜4号	PWR	運転	24	1985	---
滋賀1号	BWR	運転	16	1994	---
滋賀2号	ABWR	運転	3	2006	---
女川1号	BWR	運転	25	1984	---
女川2号	BWR	運転	14	1995	---
女川3号	BWR	運転	7	2002	---
川内1号	PWR	運転	25	1984	---
川内2号	PWR	運転	24	1985	---
大間	ABWR	建設	0	---	---
大飯1号	PWR	運転	30	1979	---
大飯2号	PWR	運転	30	1979	---
大飯3号	PWR	運転	18	1991	---
大飯4号	PWR	運転	16	1993	---
島根1号	BWR	運転	35	1974	---
島根2号	BWR	運転	20	1989	---
島根3号	ABWR	建設	0	---	---
東海	GCR	廃炉	32	1966	1998
東海第二	BWR	運転	31	1978	---
東通1号	BWR	運転	4	2005	---
動力試験炉	BWR	廃炉	19	1963	1982
敦賀1号	BWR	運転	39	1970	---
敦賀2号	PWR	運転	22	1987	---

プラント名	炉型	運転状況	運転年数	運転開始 (年)	運転終了 (年)
柏崎刈羽1号	BWR	運転	24	1985	---
柏崎刈羽2号	BWR	運転	19	1990	---
柏崎刈羽3号	BWR	運転	16	1993	---
柏崎刈羽4号	BWR	運転	15	1994	---
柏崎刈羽5号	BWR	運転	19	1990	---
柏崎刈羽6号	ABWR	運転	13	1996	---
柏崎刈羽7号	ABWR	運転	12	1997	---
泊1号	PWR	運転	20	1989	---
泊2号	PWR	運転	18	1991	---
泊3号	PWR	建設	0	---	---
美浜1号	PWR	運転	39	1970	---
美浜2号	PWR	運転	37	1972	---
美浜3号	PWR	運転	33	1976	---
浜岡1号	BWR	運転	33	1976	---
浜岡2号	BWR	運転	31	1978	---
浜岡3号	BWR	運転	22	1987	---
浜岡4号	BWR	運転	16	1993	---
浜岡5号	ABWR	運転	4	2005	---
福島第一1号	BWR	運転	38	1971	---
福島第一2号	BWR	運転	35	1974	---
福島第一3号	BWR	運転	33	1976	---
福島第一4号	BWR	運転	31	1978	---
福島第一5号	BWR	運転	31	1978	---
福島第一6号	BWR	運転	30	1979	---
福島第二1号	BWR	運転	27	1982	---
福島第二2号	BWR	運転	25	1984	---
福島第二3号	BWR	運転	24	1985	---
福島第二4号	BWR	運転	22	1987	---

表2-2 米国原子力発電所一覧³⁾

プラント名	炉型	運転状況	運転年数	運転開始 (年)	運転終了 (年)
Arkansas Nuclear-1	PWR	運転	35	1974	---
Arkansas Nuclear-2	PWR	運転	29	1980	---
Beaver Valley-1	PWR	運転	33	1976	---
Beaver Valley-2	PWR	運転	22	1987	---
Big Rock Point	BWR	廃炉	34	1963	1997
Bonus	BWR	廃炉	4	1964	1968
Braidwood-1	PWR	運転	21	1988	---
Braidwood-2	PWR	運転	21	1988	---
Browns Ferry-1	BWR	運転	35	1974	---
Browns Ferry-2	BWR	運転	34	1975	---
Browns Ferry-3	BWR	運転	32	1977	---
Brunswick-1	BWR	運転	32	1977	---
Brunswick-2	BWR	運転	34	1975	---
Byron-1	PWR	運転	24	1985	---
Byron-2	PWR	運転	22	1987	---
Callaway-1	PWR	運転	25	1984	---
Calvert Cliffs-1	PWR	運転	34	1975	---
Calvert Cliffs-2	PWR	運転	32	1977	---
Catawba-1	PWR	運転	24	1985	---
Catawba-2	PWR	運転	23	1986	---
Clinton-1	BWR	運転	22	1987	---
Columbia-2*	BWR	運転	25	1984	---
Comanche Peak-1	PWR	運転	19	1990	---
Comanche Peak-2	PWR	運転	16	1993	---
Cooper	BWR	運転	25	1974	---
Crystal River-3	PWR	運転	22	1977	---
Cvtr	HWR	廃炉	4	1963	1967
Davis Besse-1	PWR	運転	21	1978	---

プラント名	炉型	運転状況	運転年数	運転開始 (年)	運転終了 (年)
Diablo Canyon-1	PWR	運転	24	1985	---
Diablo Canyon-2	PWR	運転	23	1986	---
Donald Cook-1	PWR	運転	34	1975	---
Donald Cook-2	PWR	運転	31	1978	---
Dresden-1	BWR	廃炉	24	1960	1984
Dresden-2	BWR	運転	39	1970	---
Dresden-3	BWR	運転	38	1971	---
Duane Arnold-1	BWR	運転	34	1975	---
Ebr- II	LMFBR	廃炉	29	1965	1994
Elk River	BWR	廃炉	4	1964	1968
Enrico Fermi-1	FBR	廃炉	6	1966	1972
Enrico Fermi-2	BWR	運転	21	1988	---
Farley-1	PWR	運転	32	1977	---
Farley-2	PWR	運転	28	1981	---
Fitzpatrick	BWR	運転	34	1975	---
Fort Calhoun-1	PWR	運転	35	1974	---
Fort St.veain	HTGR	廃炉	10	1979	1989
Grand Gulf-1	BWR	運転	24	1985	---
H.B. Robinson-2	PWR	運転	38	1971	---
Haddam Neck	PWR	廃炉	28	1968	1996
Hallam	SGR	廃炉	1	1963	1964
Hatch-1	BWR	運転	34	1975	---
Hatch-2	BWR	運転	30	1979	---
Hope Creek-1	BWR	運転	23	1986	---
Humboldt Bay	BWR	廃炉	13	1963	1976
Indian Point-1	PWR	廃炉	12	1962	1974
Indian Point-2	PWR	運転	35	1974	---
Indian Point-3	PWR	運転	33	1976	---
Kewaunee	PWR	運転	35	1974	---

プラント名	炉型	運転状況	運転年数	運転開始 (年)	運転終了 (年)
Lacrosse	BWR	廃炉	18	1969	1987
LaSalle-1	BWR	運転	25	1984	---
LaSalle-2	BWR	運転	25	1984	---
Limerick-1	BWR	運転	23	1986	---
Limerick-2	BWR	運転	19	1990	---
Maine Yankee	PWR	廃炉	29	1972	1997
McGuire-1	PWR	運転	28	1981	---
McGuire-2	PWR	運転	25	1984	---
Millstone-1	BWR	廃炉	27	1971	1998
Millstone-2	PWR	運転	34	1975	---
Millstone-3	PWR	運転	23	1986	---
Monticello	BWR	運転	38	1971	---
N Reactor	LWGR	廃炉	22	1966	1988
Nine Mile Point-1	BWR	運転	40	1969	---
Nine Mile Point-2	BWR	運転	21	1988	---
North Anna-1	PWR	運転	31	1978	---
North Anna-2	PWR	運転	29	1980	---
Oconee-1	PWR	運転	36	1973	---
Oconee-2	PWR	運転	35	1974	---
Oconee-3	PWR	運転	35	1974	---
Oyster Creek	BWR	運転	40	1969	---
Palisades	PWR	運転	38	1971	---
Palo Verde-1	PWR	運転	23	1986	---
Palo Verde-2	PWR	運転	23	1986	---
Palo Verde-3	PWR	運転	21	1988	---
Pathfinder	BWR	廃炉	1	1966	1967
Peach Bottom-1	HTGR	廃炉	7	1967	1974
Peach Bottom-2	BWR	運転	35	1974	---
Peach Bottom-3	BWR	運転	35	1974	---

プラント名	炉型	運転状況	運転年数	運転開始 (年)	運転終了 (年)
Perry-1	BWR	運転	22	1987	---
Pilgrim-1	BWR	運転	37	1972	---
Piqua	OMR	廃炉	3	1963	1966
Point Beach-1	PWR	運転	39	1970	---
Point Beach-2	PWR	運転	37	1972	---
Prairie Island-1	PWR	運転	36	1973	---
Prairie Island-2	PWR	運転	35	1974	---
Quad Cities-1	BWR	運転	36	1973	---
Quad Cities-2	BWR	運転	36	1973	---
R.E. Ginna	PWR	運転	39	1970	---
Rancho Seco-1	PWR	廃炉	14	1975	1989
River Bend-1	BWR	運転	23	1986	---
Salem-1	PWR	運転	32	1977	---
Salem-2	PWR	運転	28	1981	---
San Onofre-1	PWR	廃炉	24	1968	1992
San Onofre-2	PWR	運転	26	1983	---
San Onofre-3	PWR	運転	25	1984	---
Seabrook-1	PWR	運転	19	1990	---
Sequoyah-1	PWR	運転	28	1981	---
Sequoyah-2	PWR	運転	27	1982	---
Shearon Harris-1	PWR	運転	22	1987	---
Shippingport-1	PWR	廃炉	0	1957	1957
Shippingport-2	LWBR	廃炉	5	1977	1982
Shoreham	BWR	廃炉	3	1986	1989
South Texas-1	PWR	運転	21	1988	---
South Texas-2	PWR	運転	20	1989	---
St. Lucie-1	PWR	運転	33	1976	---
St. Lucie-2	PWR	運転	26	1983	---
Surry-1	PWR	運転	37	1972	---

プラント名	炉型	運転状況	運転年数	運転開始 (年)	運転終了 (年)
Surry-2	PWR	運転	36	1973	---
Susquehanna-1	BWR	運転	26	1983	---
Susquehanna-2	BWR	運転	24	1985	---
Three Mile Island-1	PWR	運転	35	1974	---
Three Mile Island-2	PWR	廃炉	1	1978	1979
Trojan	PWR	廃炉	17	1976	1993
Turkey Point-3	PWR	運転	37	1972	---
Turkey Point-4	PWR	運転	36	1973	---
Vermont Yankee	BWR	運転	37	1972	---
Virgil C. Summer- 1	PWR	運転	25	1984	---
Vogtle-1	PWR	運転	22	1987	---
Vogtle-2	PWR	運転	20	1989	---
Waterford-3	PWR	運転	24	1985	---
Watts Bar-1	PWR	運転	13	1996	---
Watts Bar-2	PWR	建設中	0	0	---
Wolf Creek	PWR	運転	24	1985	---
Yankee Rowe-1	PWR	廃炉	31	1961	1992
Zion-1	PWR	廃炉	25	1973	1998
Zion-2	PWR	廃炉	24	1974	1998

2.2.2. 現在のプラント運転・建設状況

2009年現在の日米におけるプラント運転・建設状況ならびに炉型を表-2-3に示す。この表は上記に示した原子力発電所一覧表から作成した。表から分かる様に、日本では現在55基のプラントが運転中、4基が建設中であり、一方米国では104基が運転中、1基が建設中である。

近年、日本では米国よりも原子力発電所を建設している経緯もあり、発電面において日本では今後も原子力発電所設備の推進を図っていく動向がうかがえる。

表-2-3 日米プラント運転・建設状況（2009年）

炉型	日本			米国		
	発電所数	運転中	建設中	発電所数	運転中	建設中
PWR	24	23	1	70	69	1
BWR	28	28	0	35	35	0
ABWR	6	4	2	0	0	0
FBR	1	0	1	0	0	0
合計	59	55	4	105	104	1

参考文献

- 1)原子力防災基礎用語集 (http://www.bousai.ne.jp/vis/bousai_kensyu/glossary/index.html) 内、
「加圧水型原子炉 (PWR)」 (http://www.bousai.ne.jp/vis/bousai_kensyu/glossary/ka02.html)
「沸騰水型原子炉 (BWR)」 (http://www.bousai.ne.jp/vis/bousai_kensyu/glossary/hu06.html)
「減速材」 (http://www.bousai.ne.jp/vis/bousai_kensyu/glossary/ke37.html)
「蒸気発生器」 (http://www.bousai.ne.jp/vis/bousai_kensyu/glossary/si25.html)
- 2)資源エネルギー庁 (原子力2007)
- 3)日本原子力産業協会 (JAIF ; <http://www.jaif.or.jp/>) 内、
「日本と世界の原子力」 (http://www.jaif.or.jp/ja/nuclear_world/overseas/f0103.html)
「立地道県別の原子力発電所一覧」 (http://www.jaif.or.jp/ja/nuclear_world/data/image/5ken-itiran.jpg)
「米国における閉鎖した原子力発電所の概要」 (<http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/05/05020306/01.gif>)

3. 被害の著しい原子力発電所における火災事例の調査

3.1. 調査対象

NRC「NUREG/CR-6738 火災事象から得られたリスク手法の知見¹⁾」(サンディア国立研究所, 2001年発行)を参照し、過去に起きた被害の著しい原子力発電所火災事故を考察した。この文献から調査対象である火災事例を抽出したところ、以下の区分のどれか、あるいは複数に当てはまるものの25件が得られた。

- (1)大規模または深刻な火災→深刻あるいは広範囲に及ぶ損傷を与える。
- (2)原子炉の安全性に重大な問題をもたらした火災→複数トレインに影響を与える。
- (3)興味深い火災→異常事象の連鎖等大規模火災事例。

3.2. 大規模火災事例

3.2.1. ケーブル火災

3.2.1.1. 自然発火ケーブル火災

自然発火ケーブル火災とはケーブル内の欠陥または電流過負荷により発生する火災のことである。調査対象のうち米国1件及びソ連6件で発生している。自然発火ケーブル火災は一般に、非常に発生確率の低い事象として想定される。米国で発生した事例はSan Onofreで発生したもので、これは現在米国の原発で適用されるIEEE-383^{註1)}の基準が定められる前に建設された。またソ連に関してはケーブル材料、施工、維持管理及び電気的な設計特性などが米国のそれとは異なるために、発生件数が多いと考えられる。

註1) IEEE-383

原子力発電所用ケーブルなどの規格。この中にグループケーブルの燃焼試験方法が規定されている。幅305mmの垂直トレイに長さ2.4mのケーブルを所定の本数取り付け、リボンバーナで20分間加熱し、延焼距離を測定する。

3.2.1.2. 重大なケーブル火災

原子力発電所のケーブル火災は安全上重要な装置等に重大な影響を与え、原子炉の安全性を脅かす。米国においてそのような火災の唯一の例はブラウンズフェリー火災である。また米国以外ではソ連での5件が確認されている。ここで米国およびソ連でこれまでに発生したケーブル火災を比較すると、ソ連の方が広範囲な損傷を伴うものが多い。この原因は以下の2点が考えられる。

- (1)米国の低延焼性ケーブルの利用による。
- (2)米国では防火障壁の貫通部に周到な注意がはらわれているため。

3.2.2. タービン火災

調査対象は2件のケーブル火災を除き全てが発電側で発生し、その大半がタービン建屋であった。タービンには潤滑油及び冷却用の水素があり、大規模火災に対する大きな寄与因子となる。具体的にタービンブレードの故障（タービンミサイル）により潤滑油パイプの破断を引き起こした火災は、プラントに大きな損傷を与えた。

タービン建屋の火災は、損傷を受ける機械の数、煙の伝播、構造体の損傷等プラント自体に大規模な損害をもたらすものであるが、このような火災が全て原子炉の安全性に影響を与えるものではない。

図-3-1にはタービン火災の例としてVandellósでの火災を表す。

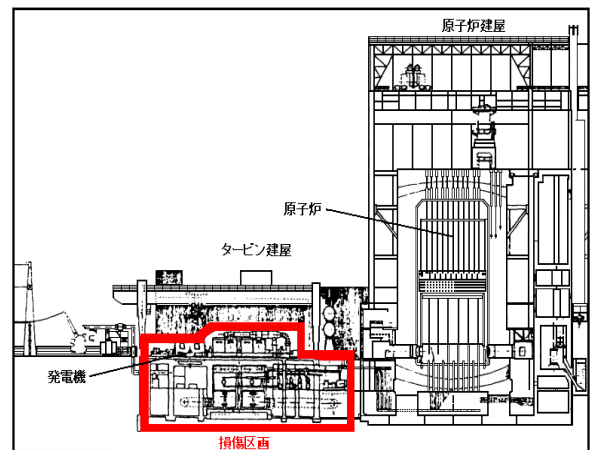


図-3-1 Vandellósでの火災の損傷区画

(出典；原子力百科事典ATOMICA²⁾)

3.3. 火災の伝播

3.3.1. 防火障壁の損傷と区画間の延焼

サンディア国立研究所の調査により、区画間の延焼が確認された箇所は以下の3点である。

- (1)ケーブル
- (2)高温ガス
- (3)貫通部

現行の火災PRA^{註2)}ではすべての障壁が適切に設計、施工されるために区画間の延焼の確率は非常に低いという見解を本文献より得られた。

註2) 火災PRA (Probabilistic Risk Assessment；確率論的安全評価)

「火災の発生」、「装置故障」及び「人的過誤」などのイベントの連鎖を特定することにより、炉心損傷、放射線放出等の重大な被害をもたらす事象の発生頻度を推定するものである。この文献では炉心損傷頻度 (CDF[※]) を対象として、それぞれの火災事象を調査したものである。次項の表-3-1にCDFを求めるための基礎的要素を示す。

※CDF (Core Damage Frequency；炉心損傷頻度) =

「想定される火災の頻度」×「想定される火災がプラント装置に損傷を与える頻度」×
「想定される装置の損傷及び運転員がその復旧に失敗した結果炉心損傷に至る頻度」

表-3-1 CDFを求めるための基礎的要素

CDFを求めるための3つの項	火災シナリオの作成に必要な基礎的要素
火災発生頻度	燃焼性物質または引火性物質の存在
	発火源の存在
	燃料と発火源および発火の一体化
火災損傷条件付き確率	火災の成長と伝播
	火災の検知と抑制
	装置およびケーブルの損傷
炉心損傷の条件付き確率	独立損傷
	プラント運転員の復旧措置

3.3.2. 隣接区画に対する火災影響(高温ガス、煙)の伝播

今回の調査対象からは以下のような事例が確認された。

- PVCの燃焼及び水との反応により塩酸蒸気発生。→隣接区画の装置に影響を与える。
- 高温ガスの影響により天井シールが損傷し延焼ルートが開かれる。
- 伝播した煙により出火場所ではない区画で自動火災抑制システムが作動した。→消火作業を阻害。
- タービン建屋での火災で発生した煙が制御室に侵入。→制御室の放棄につながる。

3.3.3. 制御室内の煙

調査対象のうち9件の火災において、煙が制御室に侵入した。しかしながら制御室の放棄につながった1件を除き、煙の侵入後も制御室から追加的な措置を実施することにより原子炉を安定的な状態に維持することができた。また現行の火災PRAでは制御室への煙流入により運転員の信頼性に影響を与えることは想定しておらず、また煙流入により制御室の放棄につながるとも想定していない。

3.4. 装置の損傷

3.4.1. 装置の誤作動

調査対象の火災事例から以下のような装置の誤作動が確認された。

(1)Armenia原発

- 遮断機が火災による誤作動で閉鎖され、これにより発電機が送電系統に接続されタービン発電機と変圧器から2次火災が発生した。
- 制御回路内のケーブルが火災により損傷し、給水ポンプが誤作動を起こした。これによりポンプは潤滑油の注入なく始動した。
- 火災によるケーブルの損傷により計測装置が誤った数値を示し、これにより複数の非常信号が作動した。

(2)Ig35 nalia原発

- 油量レベル表示機と警報回路のケーブルの欠陥により主冷却ポンプが自動的にトリップした。

(3)Chernobyl原発

- 施工時におけるケーブルの品質低下により発電機遮断器の誤閉鎖をもたらし、発電機への逆給電、発電機ローター故障、タービン油及び水素の流出をもたらし、火災へと発展した。

(4)Brawns Ferry原発

- 計測装置の誤作動により、残留熱除去、炉心スプレー、高圧炉心注入システムが起動したという情報が制御室に送信された。

以上の装置の誤作動に関しては、「火災の結果生じる誤作動」あるいは「火災を生じさせる誤作動」に分類することができる。

3.4.2. 損傷と火災抑制のタイミング

調査対象の火災における「火災発生」から「装置の損傷を引き起こす」までの時間は、10分～5時間の範囲である。また調査対象の「損傷の発生時間」と「鎮火時間」との比較から、火災事象においては装置の損傷時間が長くなりえるといえる。

調査対象の25件の消火方法に関しては、「自動抑制システムのみで消火」が2件、「手動消火活動による消火」が15件、「自動抑制システムと手動消火活動による消火」が8件である。

次項の表-3-2に調査対象の火災の時間要素を示す。

表-3-2 火災の時間要素

プラント	以下までの時間		装置の損傷時間 (B) - (A) (時間:分)
	最後の損傷 (A)	鎮火 (B)	
Browns Ferry	5:10	7:25	2:15
Fort St. Vrain	0:09	0:16	0:07
Armenia NPP	2:50	7:03	4:13
Ignaria-2	0:18	0:38	0:20
Vendellos-1	1:54	6:21	4:27
Narora-1	0:30	9:00	8:30
Waterford-3	0:10	2:37	2:27

3.4.3. 火災による建造物の損傷

調査対象のうち6件で、火災により建造物が損傷を受けた。またそれらはすべて2次側(発電側)で起きたものである。具体的にはタービン建屋で発生した大規模火災により、屋根や外壁が損傷を受けたというものがほとんどである。また構造体が損傷を受けたことにより、消防隊の消火活動が阻害されたという事例もある。

3.5. プラント安全性機能に対する影響

3.5.1. 複数安全トレインに対する影響

米国ではブラウズフェリーでの火災が唯一複数トレインに影響をもたらしたものであるが、ソ連ではそのような事例は7件起きた。またソ連で起きたうちの1件では水による消火活動を可能にするために電源を切り、事実上複数の安全トレインが使用不可能となった。複数の安全トレインが影響を受けた火災では、1つの安全トレイン復旧において、運転員が重要な役割を果たした。

3.5.2. 炉心冷却能力の深刻な劣化

上記6件の「複数安全トレインに対する影響」を受けた火災では、冷却機能の深刻な劣化も被った。6件のうち3件では発電所が停電したため炉心冷却能力を失った。またプラント起動直前に火災が発生した2件の事例においても、冷却機能の劣化をもたらすものがある。

3.5.3. 人的過誤イベント (HE)

人的過誤イベントは以下の2種類に分類できる。

(1)火災→HE

(2)HE→火災

上記の詳細を次項に示す。

(1)火災発生後の人的過誤イベント

- Waterford(1985)での事象では、出火場所にいた作業員の誤った連絡により、未損傷のポンプが制御室から停止された。
- H.B. Robinsonでの事象では、作業員が誤って水素源(hydrogen source)をプラントの圧縮空気系に接続した。水素側の圧力の方が高かったためにプラント全体に水素が回り発火源が存在する複数の点で引火した。
- Chernobylでの事象では、出火後に原子炉がトリップしたが、その際にタービン発電機を送電線から分離することに失敗した結果、約20分間発電機がモーターとして作用した。
- Oconeeでの事象では、出火後に原子炉がトリップしたが、その際に主給水弁の閉止に失敗した結果、高圧注入系が作動し原子炉の過冷却事象となった。
- Waterford(1995)での事象では、火災の際に運転員が火災の発生を迅速に宣言しなかったために、消火活動の遅れにつながった。

(2)火災発生前の人的過誤イベント

- Browns Ferryでの事象では、作業員が蠟燭を用いて試験をしたために火災が発生した。
- South Ukraineでの事例では、固定式火災抑制システムが手動モードに切り替えられていた。
- Armeniaでの事例では、固定式火災抑制システムが手動モードに切り替えられていた。またこれは火災損傷により動作不能となった。

以上の人的過誤イベントは以下の2種類に分類できる。その種類と件数は表-3-3に示す。

- (i)コミッションエラー：運転員が状況を複雑化あるいは望ましくない状況を作り出すもの。
- (ii)オMISSIONエラー：運転員が当該事象の緩和に寄与する措置を講じないもの。

表-3-3 人的過誤イベントの種類と件数

	火災発生前	火災発生後
コミッション エラー	1件 (1)	1件 (2)
オMISSION エラー	3件 (3)	3件 (4)

3.5.4. 効果を評価される人間による復旧措置

今回の調査では、人間による復旧措置に関して以下に示す2点の知見を得た。

(1)手順書に掲載されていない措置によるプラント復旧の成功例

- Armeniaでの事例では、運転員が発電所停電状態を克服するために、新たな電力ケーブルを敷設してディーゼル発電機から冷却用ポンプを稼働させた。
- Greifswaldでの事例では、発電所停止時に補助給水ポンプを復旧させるために運転員が隣接ユニットから給電経路を設けた
- Browns Ferryでの事象では、火災で損傷したケーブルを迂回することによりプラントの計器を復旧させた。また冷却用ポンプではないCRD(制御棒駆動装置)を用いて炉心の冷却を試みた。
- South Ukraineでの事例では、火災検知器が故障していたが、格納容器の圧力上昇により火災の発生に気がついた。
- Naroraでの事例では、手動で炉心に放散を注入し、原子炉の安定の維持を試み、また消火用ポンプを用いて蒸気発生器に給水した。

(2)煙と火災の影響

- 9件の事例で煙が制御室に入り込み、1件では制御室の放棄につながった。
- Vandellosでの事象では、呼吸装置を装着した運転員が、煙が充満する区画で弁の操作に成功した。
- Browns Ferryでの事象では、煙のためにトーラスの冷却に必要な弁を手動で開くことができなかった。

3.5.5. 非安全関連区域での火災

非安全区域で発生した火災であっても、調査対象のうち3件では原子炉の安全に影響を与えるものであった。

- Oconeeの事例；非安全区域での火災→人的過誤→装置の停止→原子炉過冷却
- North Annaの事例；主変圧器での火災→非安全関連ケーブル損傷→誤信号発信

3.6. まとめ

(1)ケーブル火災

- 自然発火ケーブル火災は一般に、非常に発生確率の低い事象である。
- 原子力発電所のケーブル火災は安全上重要な装置等に重大な影響を与える。

(2)タービン火災

- 損傷を受ける機械の数、煙の伝播、構造体の損傷等プラント自体に大規模な損害をもたらす。
- タービン火災全てがプラント安全機能に影響をもたらすものではない。

(3)火災の伝播

- IEEE-383認定済みのケーブルでも十分なエネルギー源を持つ燃焼源がある場合、燃焼が継続し伝播する可能性がある。
- 米ソ間ではケーブル火災あるいは区画延焼火災の件数に差がある。→ケーブル、防火障壁等の設計、材料等の違いによる。
- 火災による高温ガスの影響で天井シールが損傷し、延焼経路が開き延焼した。

(4)装置の損傷

- ケーブル損傷による装置の誤作動が確認された。
- 大量の燃焼性物質が存在するタービン建屋での火災による構造物の破壊が確認された。

(5)プラント安全機能に対する影響

- 消火作業のために動作可能な装置を停止し、安全機能の冗長性を喪失することがある。
- 運転員の措置が炉心冷却を確保する上で重要な役割を果たす例があるが、火災の影響(熱、煙)により失敗した例もある。
- 煙が制御室に入り、運転員の有効性に影響を及ぼすと考えられる。また1件の事例では制御室の喪失となった。

参考文献

- 1)「NUREG/CR-6738 火災事象から得られたリスク手法の知見」(サンディア国立研究所, 2001年発行)
- 2)原子力百科事典ATOMICA (<http://www.rist.or.jp/atomica/>) 内、「スペイン・バンデロス発電所1号機における火災損傷区画」

4. 日米の原子力発電所火災傾向分析

4.1. 分析対象とその抽出方法

4.1.1. 日本の火災事例

4.1.1.1. 情報源（NUCIA¹⁾）について

(1) 名称の由来

NUCIAとは、原子力施設情報公開ライブラリーを意味する英語の略称「NUClear Information Archives」の頭文字を取った名称である。

(2) 掲載されている異常事象と掲載の目的

日本の原子力発電所の異常事象のNUCIAへの登録は、下記の目的から成り立つ。

(i)日本の原子力発電所で発生する異常事象のうち、法令に基づき国への報告が必要な事象を登録することはもとより、法令に基づく報告が不要な事象であっても、

- 将来大きなトラブルに発展する前触れとして他社に注意喚起できる。
- 事象の発生状況を蓄積し、傾向分析することにより、他のプラントで適切な予防保全対策に繋げることができる。
- 確率論的安全評価に用いる故障率データの精度を高めることができる。

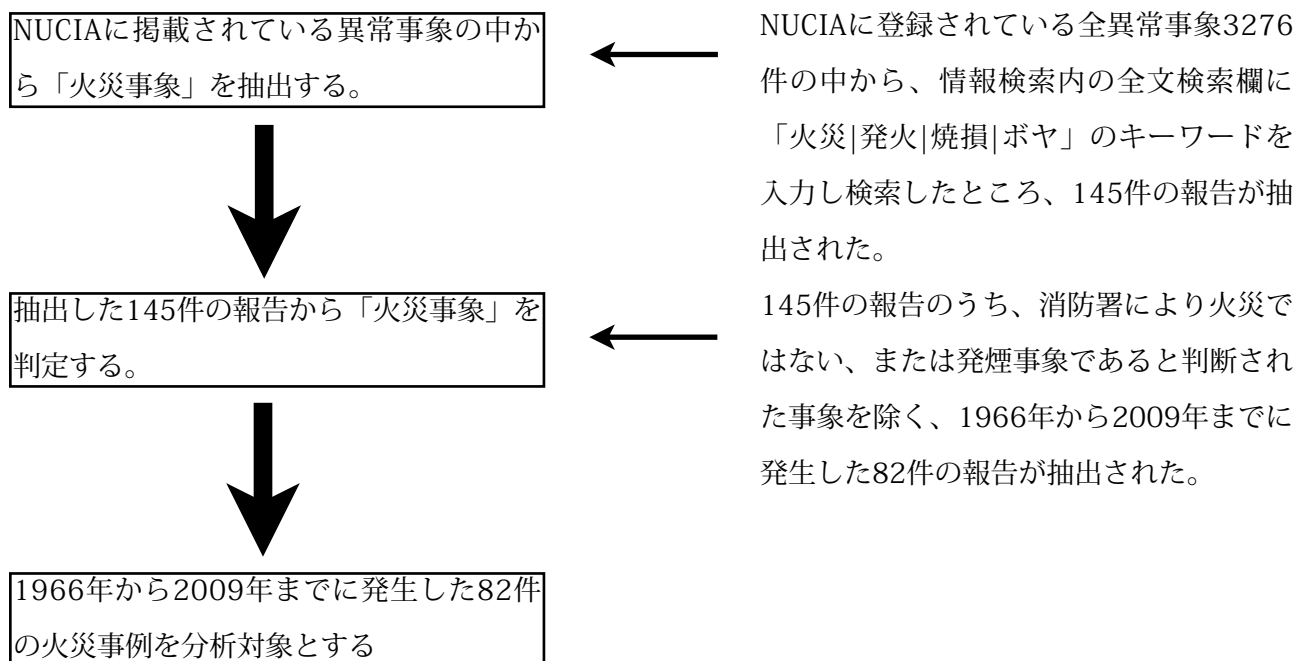
等の観点から、電力各9社（北海道電力、東北電力、東京電力、中部電力、北陸電力、関西電力、中国電力、四国電力、九州電力）と日本原子力発電株式会社、日本原熱株式会社が発生した異常事象の情報を登録・共有化し、原子力施設の運転保守業務に活用することにより保安活動の充実と強化を図るため。

(ii)日本の電力各社間の共有情報のうち、個人のプライバシー、企業秘密、核物質防護、核拡散に関するものを除き、メーカーなどの産業界、国、大学、研究機関などの産官学で共有できるよう公開することにより、設計者、規制担当者、学識経験者、研究者など多くの専門家から保安活動に対する評価や助言を得て、保安活動の更なる向上に繋げるため。

(iii)一般の人も共有情報を閲覧できるようにすることにより、トラブルの未然防止、再発防止のための活動に努め、日本発電所の保安活動に対する一般の方々の理解促進に繋げるため。

上記の3点を目的として、NUCIAでは異常事象の掲載を行っている。また、このサイトのシステム全般の維持管理・運営は日本原子力技術協会が行っている。

4.1.1.2. 火災事例の抽出方法



また火災ではないと判断した事例を別表－1に掲載する。

4.1.2. 米国の火災事例

4.1.2.1. 情報源（NRC²⁾）について

1946年に原子力の平和的利用のために、その推進及び規制を目的として米国原子力委員会（AEC；Atomic Energy Commission）が設立された。しかしながらAECは原子力産業の推進のために成長を妨げることなく規制活動をしなくてはならなかったために、規制機関として独立性を確保することが難しくかった。そこから1960年代には専門家の多くが、放射線防護基準や原子炉の安全性、環境保護を含む重要な課題に対するAECの規制が不適格であると指摘した。そこで米国議会は1974年にエネルギー再構築法（ERA；Energy Reorganization Act）を制定し、AECの廃止を決定した。

ERAによりAECが廃止され、米国における原子力の規制機能は同年に新設された政治的、技術的な独立性が確保された機関である米国原子力規制委員会（NRC；Nuclear Regulatory Commission）に移管された。NRCは、許認可、査察、研究等の規制活動を通じて、原子炉、核物質、核廃棄物施設等から放出される放射線あるいはそれらの事故から公衆の健康と安全並びに環境を保護することを使命とする。NRCの規制対象は以下のとおりである。

- (i)原子炉；発電用商用原子炉及び研究、試験、訓練用原子炉。
- (ii)材料；医療、産業及び学術用核物質の使用及び核燃料を製造する施設。
- (iii)廃棄物；核物質及び廃棄物の移動、貯蔵及び廃棄、または原子力施設の廃止措置。

4.1.2.2. 火災事例の抽出方法

NRCに登録されている異常事象の中から「火災事象」を抽出する。



1999年から2009年までに発生した104件の火災事例を分析対象とする。

「Event Notification Report」及び「Preliminary Notification Report」から、事象名あるいは本文に「fire、explosion」という単語が記載されているものを一つ一つ抽出。



4.1.3. 情報源（NUCIA, NRC）の比較

NUCIA、NRCを比較するとNUCIAの方がNRCよりも詳細な情報が掲載されている。具体的にNUCIAでは、事象発生箇所（設備名・系統名・装置名・機器名・部品名）、原因、事象発生時プラント運転状況、発電所への影響等が表にまとまっているが、一方NRCでは火災事象について文章が掲載されているのみである。これらの情報源から作成した資料は別表-2、別表-3³⁾に掲載する。

4.2. 火災発生件数

4.2.1. プラント1基あたりの火災発生件数の年推移

日米におけるプラント1基あたりの火災発生件数を図-4-1に示す。図の折れ線はその年の運転中プラント基数を、右側のY軸には火災発生件数を運転中基数で割った値を表している。

まずはじめに日本では、プラント数の増加に伴い1基あたりの火災件数も増加傾向にある様にみられる。また1966年、1967の値0.5は過去で最大値をとるが、この原因は当時2基のプラントが運転中で1件の火災が報告されているためである。

一方米国は、今回情報源として用いたNRCでは1998年以前の報告は登録されていないので、1999～2009年の11年間で算出した。

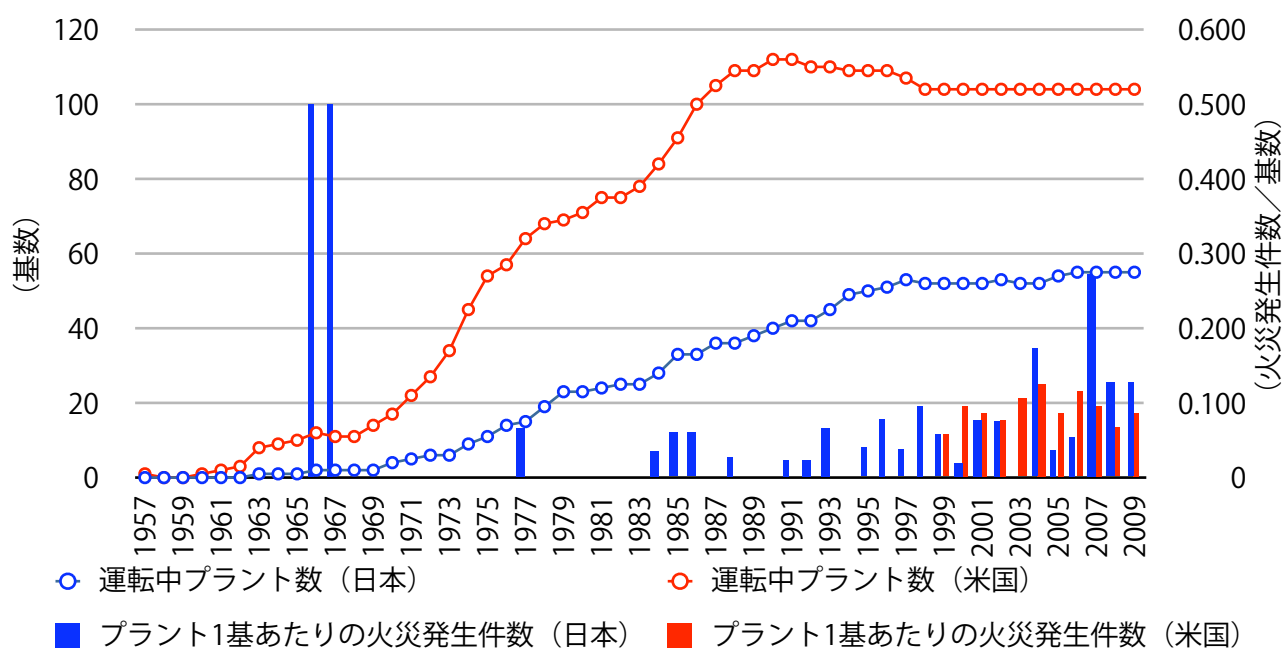


図-4-1 日米プラント1基あたりの火災発生件数年推移

4.2.2. プラント1基あたりの火災発生件数（1999～2009年）

1999～2009年の11年間に焦点をあてたプラント1基あたりの火災発生件数を図-4-2に示す。まず日本で注目すべき箇所は2007年で、この年の数値は過去11年間で最も高い0.273、すなわち運転中プラントの約27%で火災が発生していたといった割合である。また近年2008年・2009年は0.127であり、約13%のプラントで火災が発生している。

一方米国で最大値をとるのは2004年で、その値は0.125であり約13%のプラントで火災が発生していた。日本と比較すると、米国では年別の大きな違いはみられず、毎年0.1前後すなわち約10%のプラントで火災が発生していることがみてとれる。

近年の11年間は日米ともに平均して年間約10%のプラントで火災が発生しており、原子力発電所では高い確率で火災が発生していることが分かる。

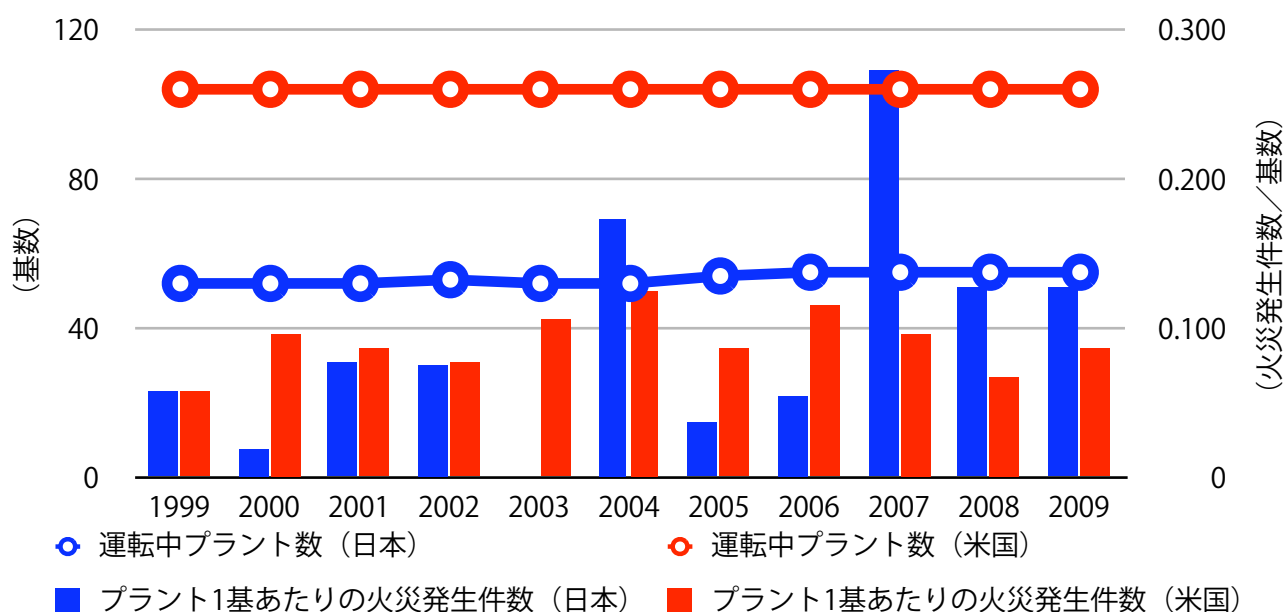


図-4-2 日米プラント1基あたりの火災発生件数年推移（1999～2009年）

4.2.3. 発電所別火災発生件数の推移

日米における発電所別プラント1基あたりの火災発生件数をそれぞれ次項、図-4-3、図-4-4に示す。ここでの火災発生件数は、日米共に1999～2009年に起きた11年間のものに統一している。また11年間で火災の発生していない発電所もいくつかあるが、この図ではそれらを除外した。

まずはじめに日本で最大値をとる発電所は泊発電所で、その値は4である。この値はすなわち11年間でプラント1基あたりに4件の火災が発生していることを表している。次に火災発生率の高い発電所は柏崎刈羽発電所で、その値は2.7である。また発電所ごとに所有するプラント数は、柏崎刈羽発電所の7基が一番多く、次に福島第一発電所の6基と続く。

一方米国で最大値をとる発電所はCOOPERで、その値は6である。次に火災発生率の高い発電所はCOLUMBIA、PILGRIMで、その値は共に3である。また発電所ごとのプラント数で一番多いのは、BROWNS FERRY、PALO VERDEで共に3基である。

図から日米共に発電所ごとの火災発生率に偏りがある様に見える。これは発電所ごとのプラント数に起因しているためであると考えていたが、浜岡発電所のプラント数と火災発生率をみると、プラント数のわりに火災発生率は低いことが分かり、この仮説は正しくないことが分かる。

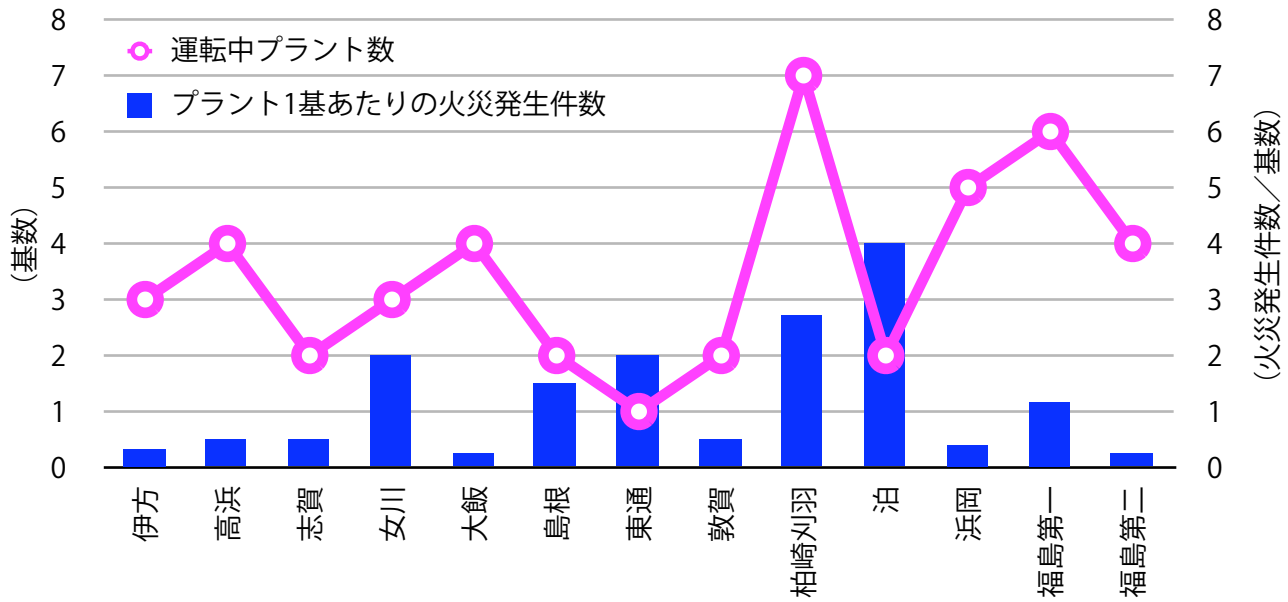


図-4-3 日本発電所別プラント1基あたりの火災発生件数

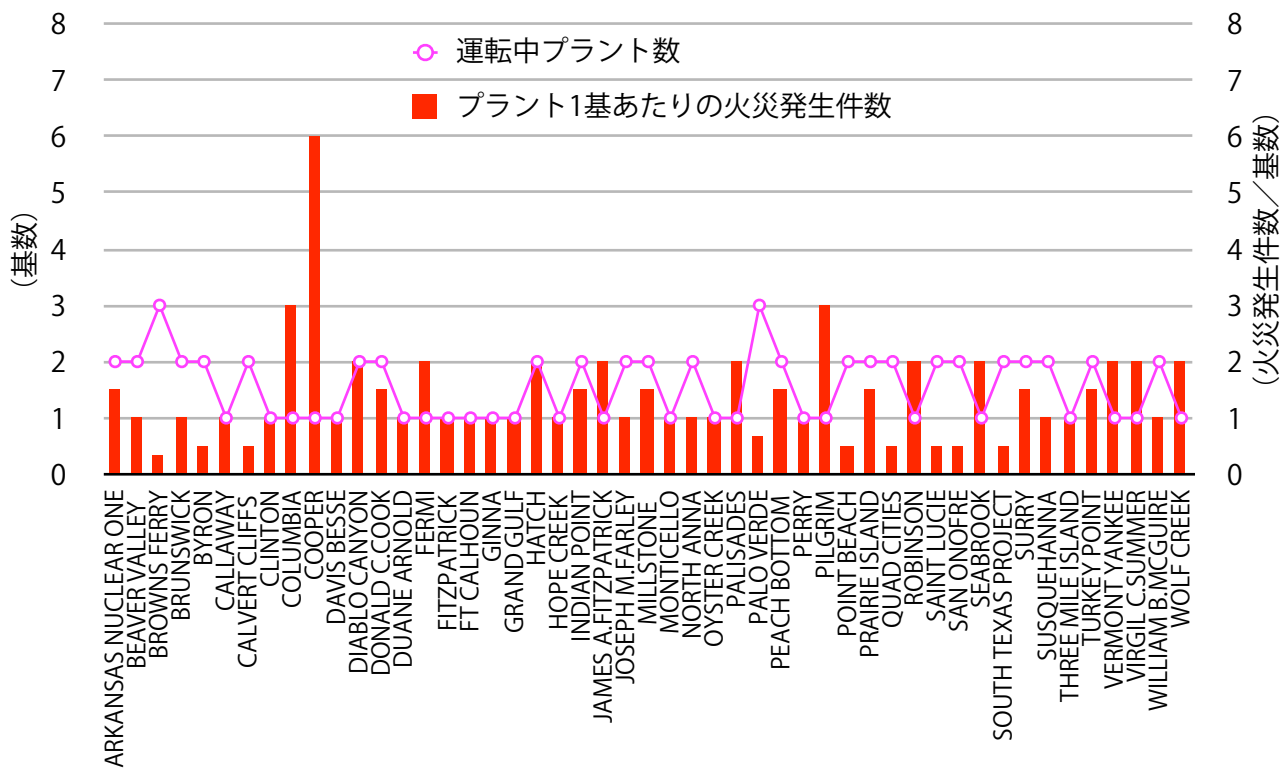


図-4-4 米国発電所別プラント1基あたりの火災発生件数

4.3. 作業もしくは設備自体が原因により発生した火災の内訳

日米における作業もしくは設備自体が原因により発生した火災の内訳を図-4-5、そしてその分類方法を表-4-1に示す。まず日本では作業火災が約57%、設備自体の火災が約26%を占めている。一方米国では作業火災が約15%、設備自体の火災は約70%を占めており、それぞれが相違な特徴を表している。この原因は日米の保守方法の差異に起因しているものと考えられるが、米国での設備自体の火災70%は保守以前の問題である様に思われる。

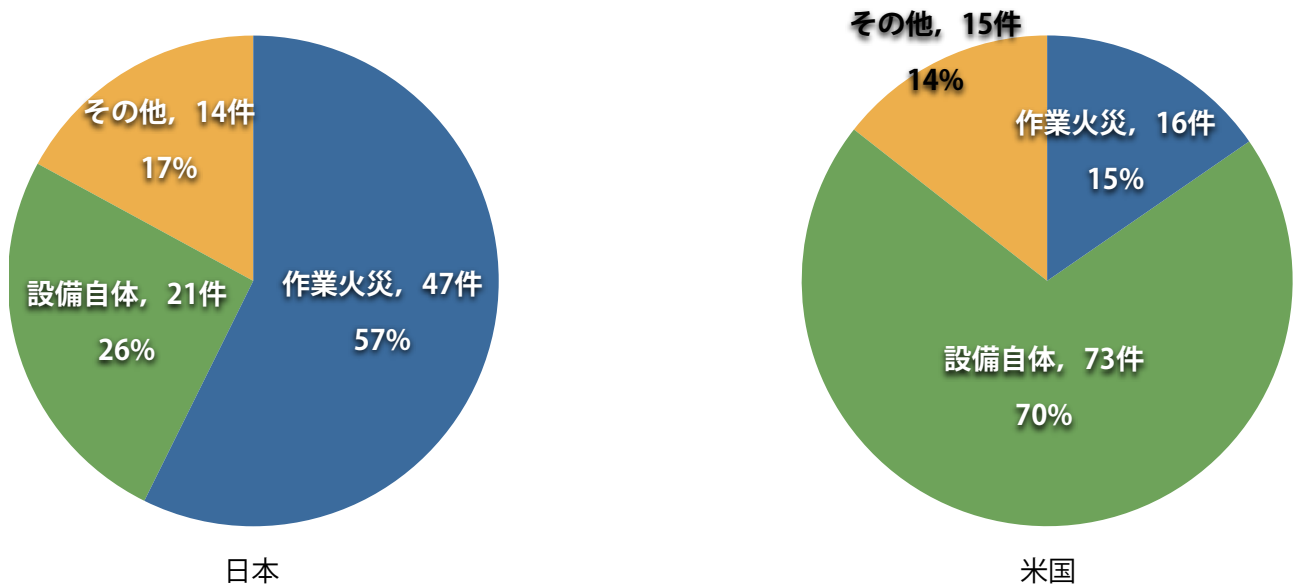


図-4-5 作業火災もしくは設備自体の火災内訳

表-4-1 火災種別分類法

火災種別	分類法
作業火災	当該作業が原因で火災に至ったもの。
設備自体	当該設備の故障等により火災に至ったもの。
その他	上記のいずれにも含まれないもの。

4.4. 出火原因

4.4.1. 出火原因（作業火災）

日米における作業火災の出火元を図-4-6、また火災の際に火種となった原因の内訳を図-4-7に示す。まず日本では溶断、溶接等の火気作業が火種となり養生シートや可燃性ガスに引火する傾向が多くみられる。一方米国でも日本と同じ様に溶断、溶接などの火気作業による火種が周辺のプラスチックやゴミに引火している。また火災のレベルはボヤなどの小規模火災がほとんどである。

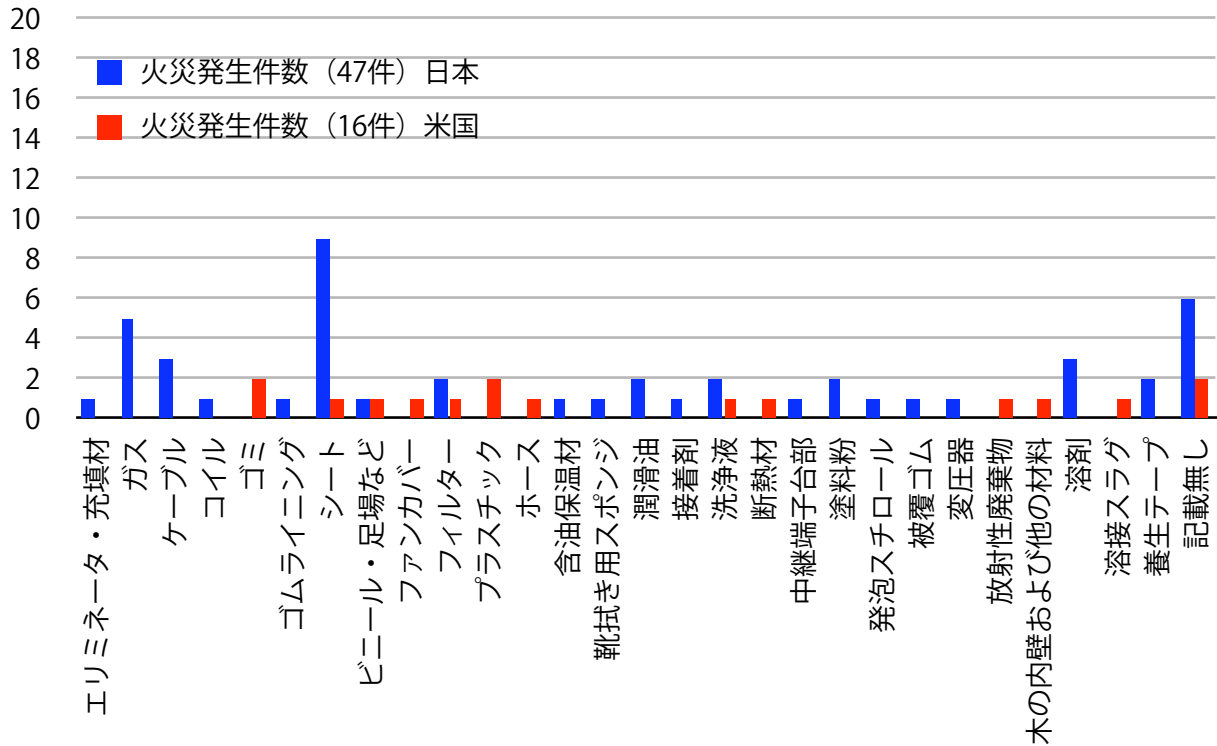


図-4-6 出火元（作業火災）

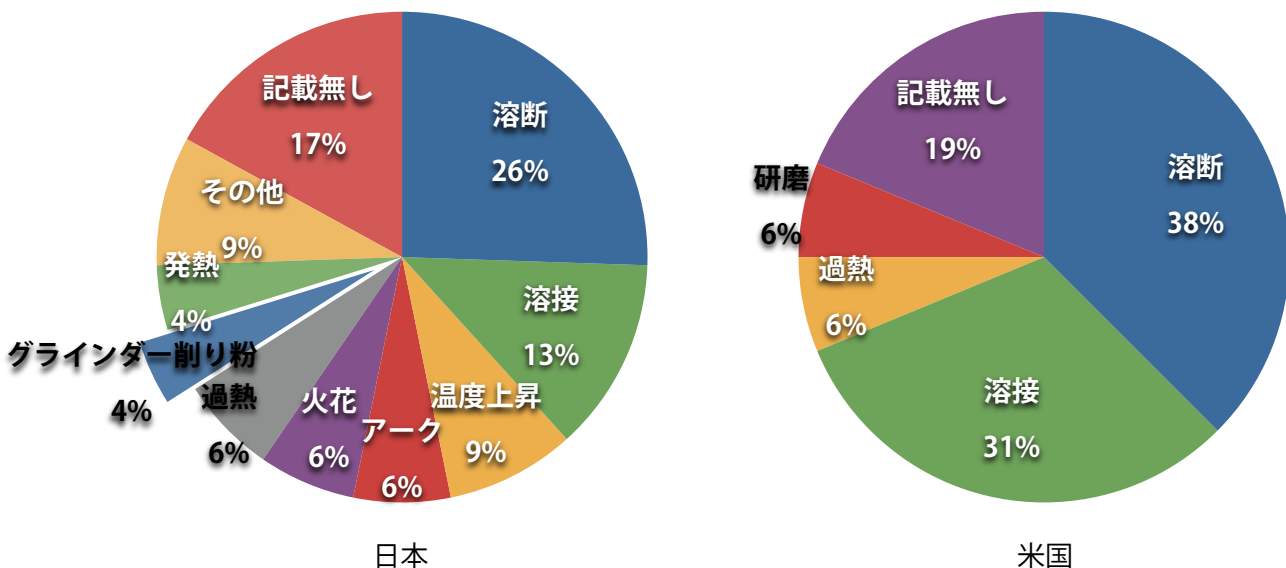


図-4-7 火種（作業火災）

4.4.2. 出火原因（設備自体）

日米における設備自体の火災の出火元を図-4-8、また火種となった原因の内訳を図-4-9に示す。まず日本ではコンデンサー、コイル、変圧器等が電流過熱などの原因で火災に至る傾向が多くみられる。一方米国では火種に関しては記載がない事例が多く傾向をつかむことはできなかったが、出火元については変圧器火災の数が群を抜いていた。

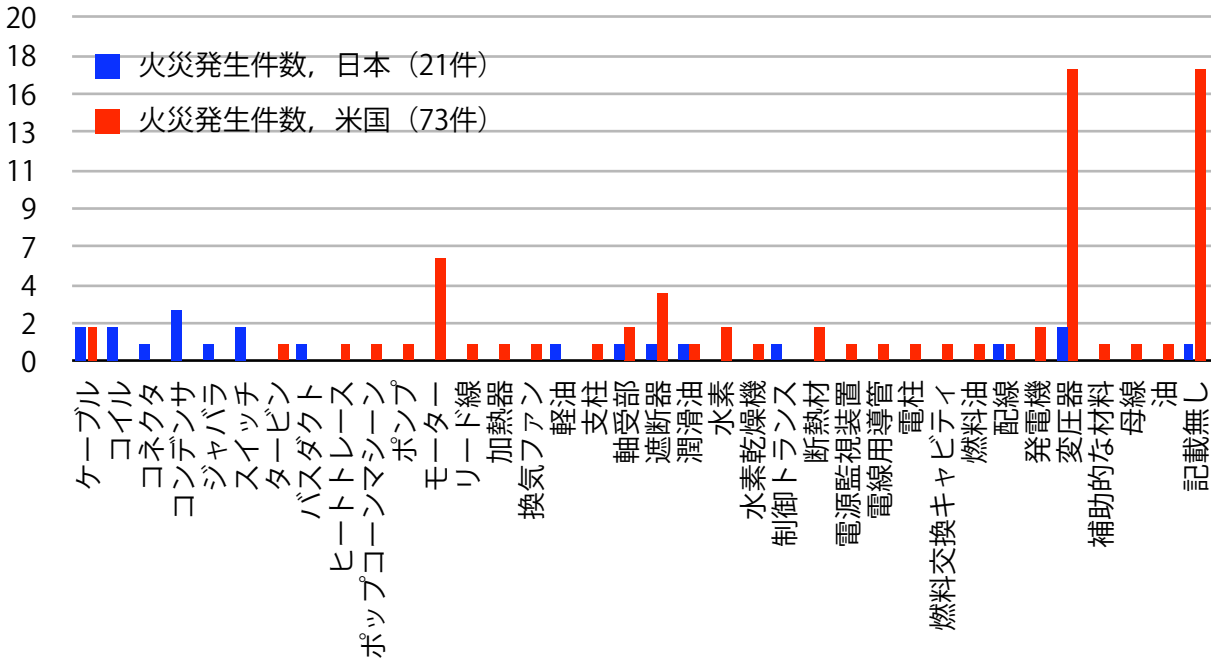


図-4-8 出火元（設備自体）

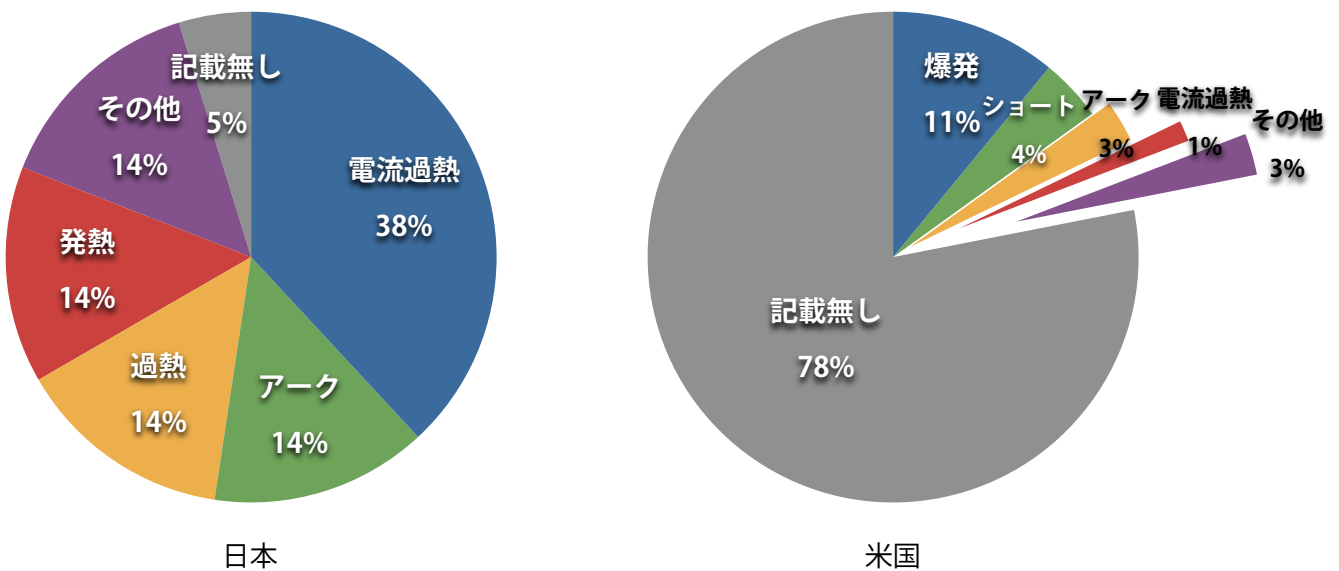


図-4-9 火種（設備自体）

4.5. 火災発生時のプラント運転状況と運転中プラントへの影響

日米における火災発生時のプラント運転状況と運転中プラントへの影響を図-4-10に示す。まず日本では停止中の火災が約38%、運転中に発生した火災の割合は約18%を占め、主に電気部品やケーブルなどの損傷による小規模火災である。また運転中プラントが原子炉停止に至る割合が7%と米国に比べて圧倒的に低いことも特徴である。

一方米国では停止中の火災が約14%、運転中の火災が約61%を占めていることが特徴である。火災による運転中のプラントへの影響については、変圧器等の主電源が喪失することなどにより約44%が原子炉停止、11%が出力低下に至っており、その影響が非常に大きいことが分かる。

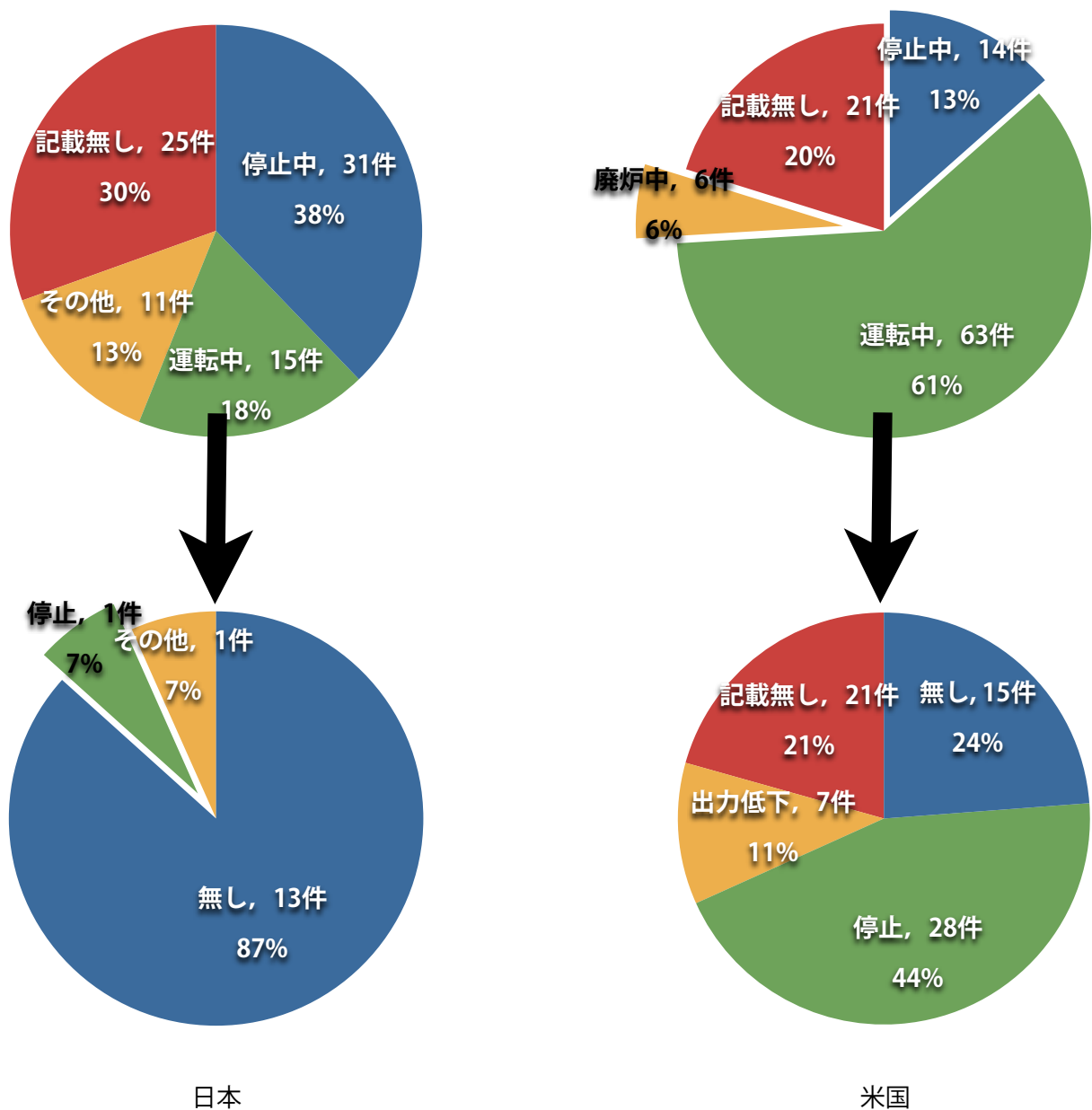


図-4-10 火災発生時プラント運転状況と運転中プラントへの影響

4.6. プラント運転年数別の火災発生率

日米におけるプラント運転年数別の火災発生件数、11年間のプラント数を図-4-11に、火災発生率を図-4-12に示す。ここでは日米ともに1999年～2009年の間で発生した火災を対象とし、火災の発生したプラントの号数が不明な事項は除外している。またこのグラフを作成するために用いた表を、日米それぞれ別表-4、別表-5に掲載する。

まず日本では運転年数17年目、24年目のプラントで火災が発生する確率が一番高く、建設中のプラントでの火災が多いことも特徴である。一方米国では運転年数32年目での火災発生率が一番高く、廃炉中のプラントでの火災が多いことが特徴である。

また運転期間10年ごとでの火災発生率の割合を下図に示す。日本では11～20年目のプラントでの火災発生率が37%、21～30年目のプラントでの火災発生率が29%と高い割合を占めている。一方米国では21～30年目が41%、31～40年目が29%と高い割合を占めている。

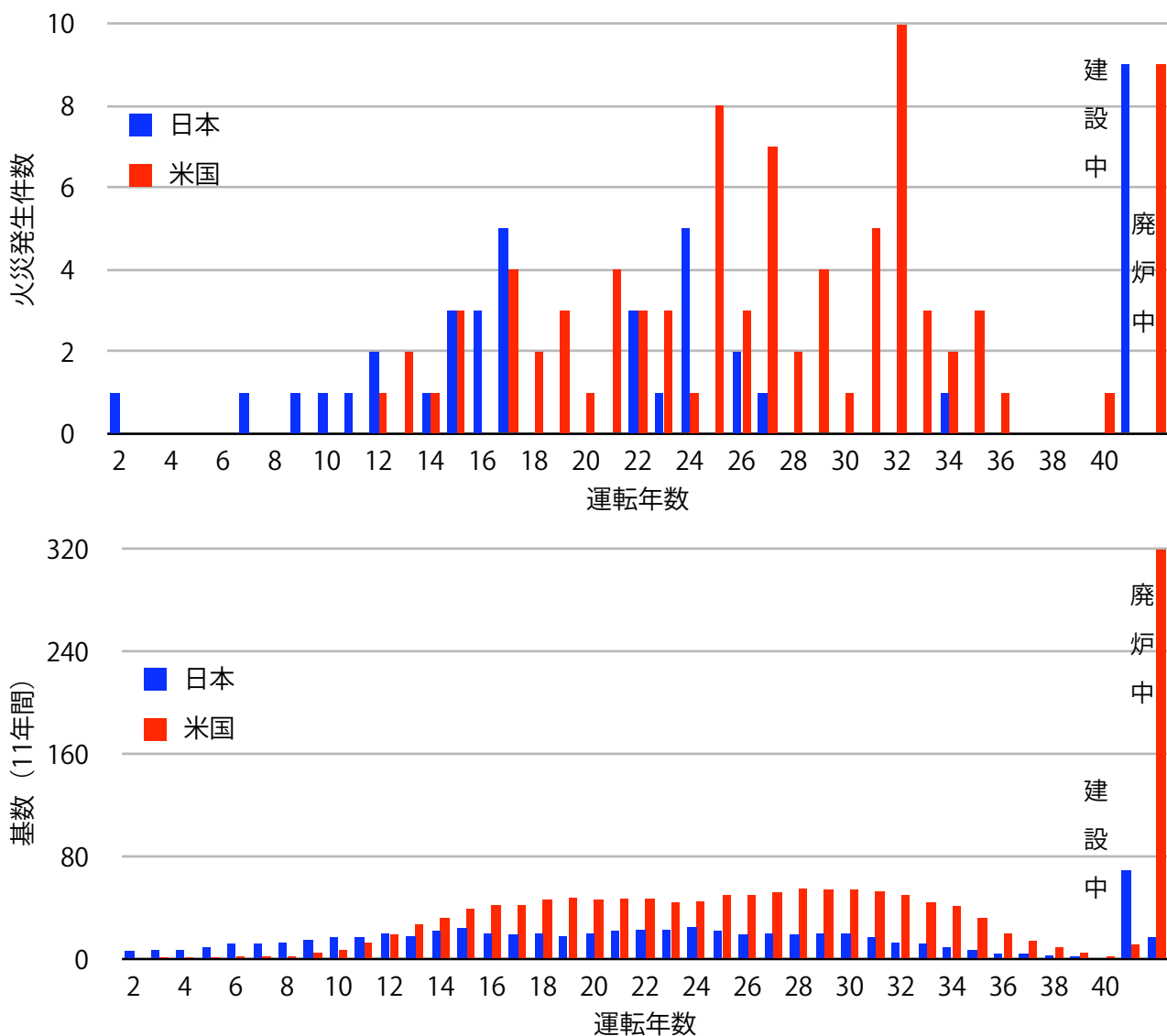


図-4-11 プラント運転年数別火災発生件数、基数（11年間）

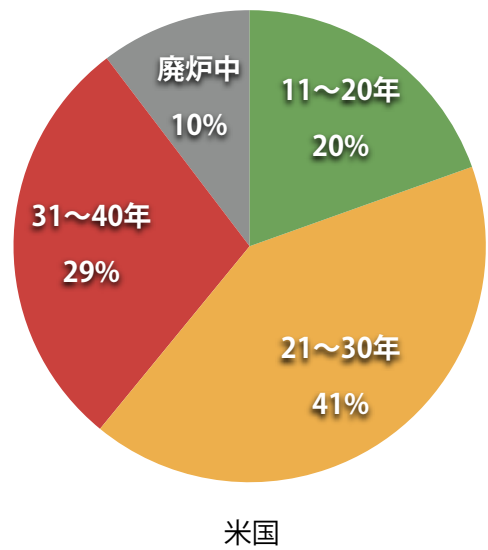
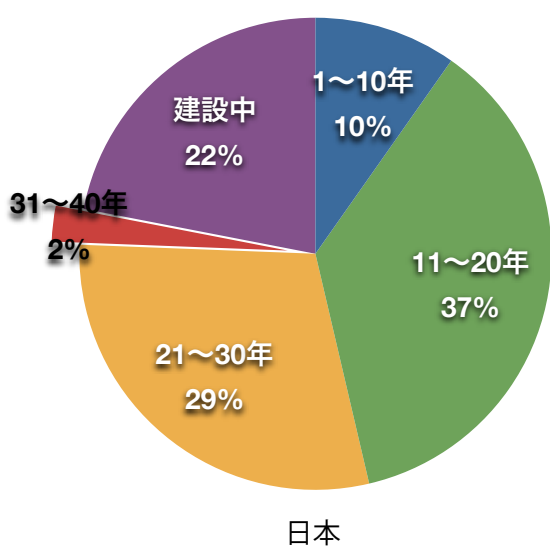
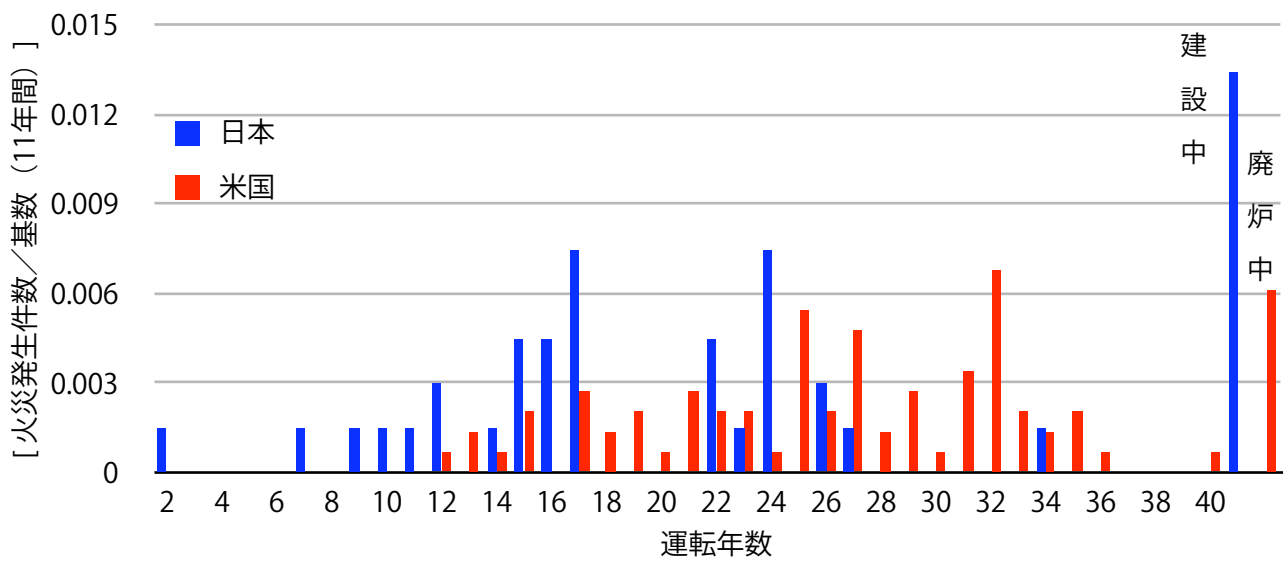


図-4-12 プラント運転年数別火災発生率の推移

4.7. 日米における原子力発電所の火災傾向比較と分析

(1)火災発生件数

- 近年の11年間は日米ともに平均して年間約10%のプラントで火災が発生している。
- 日米共に発電所ごとの火災発生率に偏りがある。
- 日本では運転年数17年目、24年目のプラントで火災が発生する確率が一番高く、建設中のプラントでの火災が多い一方で、米国では運転年数32年目での火災発生率が一番高く、廃炉中のプラントでの火災が多いことが特徴である

(2)出火原因

- 日本では作業が、米国では設備自体が原因の火災が多い。
- 作業火災は、日米共に溶断、溶接などの火気作業による火種が周辺の養生シート、プラスチックやゴミ等に引火し発生している。
- 設備自体の火災は、日米共にコンデンサー、コイル、ケーブル等の電気部品故障により発生している。また米国では特に変圧器火災の数が群を抜いている。

(3)火災発生時のプラント運転状況と運転中プラントへの影響

- 日本では停止中の火災が約38%、運転中に発生した火災の割合は約18%を占め、一方米国では停止中の火災が約14%、運転中の火災が約61%を占めていることが特徴である。
- 日本では火災によって運転中プラントが停止に至るケースは少ないが、米国では44%が原子炉停止、11%が出力低下に至っている。

参考文献

- 1)原子力施設公開ライブラリー（NUCIA；<http://www.nucia.jp/>）内、「情報検索欄」
- 2)米国原子力規制委員会（NRC；<http://www.nrc.gov/>）内、「Event Notification Report」
「Preliminary Notification Report」
- 3)U.S. Energy Information Administration（<http://www.eia.doe.gov/>）内、「U.S. Nuclear Statistics」
（<http://www.eia.doe.gov/cneaf/nuclear/page/operation/statoperation.html>）

5. 結論

今回、日米における原子力発電所の火災傾向の分析を行い、日米での火災傾向の顕著な差異ならびに類似した部分を見出すことができた。火災が重大事故に直接影響しないとはいえ、いずれにしろボヤなどの小規模な火災は高頻度で発生しており、今後とも火災防護における課題は山積みである。特に米国における変圧器の爆発および火災は重大事故発生の引き金ともなりうる事象であり、保守方法の見直しが必要であると思われる。

安全で安心な社会基盤を構築するためには、発電所の存在は必要不可欠であり、日米共に電力の大部分を補っている原子力発電所では火災のみならず、特に防護に重点をおかなければならないことは明らかである。そのためには一般の人々の原子力発電所における安全確保への理解を促す必要もあり、世界的に情報の提供と共有を果たさなければならないと私は考える。