

JAERI-Review

97-008



沸騰水型原子力発電所の非常用炉心冷却系
吸込ストレーナ閉塞事例と
米国における規制動向

1997年6月

渡辺憲夫

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibarakiken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 ニッセイエプロ株式会社

沸騰水型原子力発電所の非常用炉心冷却系吸込ストレーナ閉塞事例と
米国における規制動向

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

渡辺 憲夫

(1997年5月20日受理)

1992年7月28日に、スウェーデンの沸騰水型原子力発電所(BWR)、Barsebaeck-2号炉で、安全弁の誤作動により配管断熱材が脱落し、それがサブプレッションプールに流入して非常用炉心冷却系(ECCS)の吸込ストレーナの閉塞を引き起こすという事象が発生した。ECCS吸込ストレーナの閉塞問題は、1970年代後半に、その重要性が認識され、米国では、加圧水型原子力発電所(PWR)における格納容器サンプ内スクリーンの閉塞によるECCS再循環失敗、及び、BWRにおけるサブプレッションプール内ストレーナの閉塞による残留熱除去系の機能喪失の可能性が未解決安全問題 USI A-43に指定された。その解決策を得るために、数多くの実験及び解析が行われ、その結果を反映して1985年には規制指針RG-1.82 (「冷却材喪失事故後の長期再循環冷却水源」)の改訂も行われた(改訂第1版)。この時点で、ストレーナ閉塞問題は解決されたものと考えられていた。しかし、Barsebaeck-2号炉の事象発生以後、米国BWRにおいて類似の事象が発生したため、米国原子力規制委員会(NRC)はその重要性を再認識し、その都度、規制関連書簡(Information NoticeやBulletin)を発行して、電力会社に注意を促すと共に、いくつかの改善命令を出してきた。そして、1996年には、規制指針を再度改訂し(改訂第2版)、BWRにおけるサブプレッションプール吸込ストレーナのデブリ閉塞を評価するためのガイダンスを変更した。

ストレーナ閉塞の原因は、断熱材デブリのようにLOCA時のブローダウンによって発生するもの、腐食生成物のようにプラントの通常運転時に蓄積されるもの、エアフィルター材である繊維性物質や機器の表示ラベルのように格納容器内に設置されているもの、工具やビニールのように保守作業時に格納容器内に持ち込まれるもの、等によるとされている。従って、ストレーナの設計改良の他に、断熱材の材質変更や、サブプレッションプール及び格納容器の清掃管理の強化などの対策が講じられることとなっている。

本報告書では、まず、Barsebaeck-2号炉の事例と、それ以後米国において発生した類似事例を紹介する。次に、NRCによる対応の経緯及び規制指針RG-1.82の変更点をまとめる。さらに、NRC発行の規制関連書簡と規制指針RG-1.82改訂第2版について、その内容を紹介する。

Review of Recent Events and Regulatory Guidances Concerning Emergency Core
Cooling System Strainer Blockage at Boiling Water Reactors in the U. S. A.

Norio WATANABE

Department of Reactor Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 20, 1997)

On July 28, 1992, an event occurred at Barsebaeck Unit 2, a Swedish BWR, which involved clogging of emergency core cooling system (ECCS) strainers resulting from the insulation material dislodged by steam from a safety relief valve that spuriously opened. The issue of the ECCS strainer clogging was recognized as important to safety in the late 1970's and potential for loss of emergency recirculation cooling due to clogging of containment sump screens at PWRs and suppression pool suction strainers at BWRs was identified as Unresolved Safety Issue (USI) A-43 in the U.S.A. To obtain the resolution to this USI, a number of experimental and analytical studies had been performed before Regulatory Guide (RG) 1.82, "Water Sources for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss-of-Coolant Accident", was revised in 1985 (Revision 1). At that time, the USI was closed and the issue was resolved with the establishment of new requirements. Since similar events occurred at U. S. BWRs after the Barsebaeck-2 event, however, the U. S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) recognized the safety significance of BWR ECCS strainer clogging and issued regulatory guidance documents (Information Notices and Bulletins) to alert or request addressees to take appropriate actions. In 1996, the NRC revised RG-1.82 again to alter the evaluation guidance for suction strainer blockage at BWRs (Revision 2).

The review of recent events indicates that the strainer blockage would be caused by debris generated by a LOCA such as insulation debris, that generated during normal plant operation such as corrosion products, that stemming from fibrous filters and labeling materials installed in the containment, that stemming from maintenance-type materials such as tools and plastic bags, etc. In addition to the strainer design changes, therefore, insulation material modification and thorough cleaning of suppression pool have been requested as preventive or mitigative actions to be taken.

This report provides brief descriptions for the Barsebaeck-2 event and the subsequent ones at U. S. BWRs, describes the NRC's responses to these events sequentially, and summarizes the revised RG-1.82. Also, the contents of the NRC's guidance documents issued and the RG-1.82 Revision 2 are given.

Keywords : BWR, Strainer Clogging, NRC, Regulatory Guide, Information Notice, Bulletin,
Regulatory Guidance, Debris

目 次

1. はじめに	1
2. 沸騰水型原子力発電所におけるサプレッションプールと非常用炉心冷却系	2
3. Barsebaeck-2号炉の事例と米国における類似事例	6
3.1 Barsebaeck-2号炉の事例	6
3.2 米国における類似事例	7
4. 米国原子力規制委員会の対応と規制指針の変更	16
4.1 規制関連書簡の概要	16
4.2 対応経緯	16
4.3 規制指針の変更	23
5. おわりに	38
参考文献	39
付録Ⅰ 米国原子力規制委員会発行の規制関連書簡の内容	41
1. Information Notice 92-71	41
2. Information Notice 93-34及びSupplement 1	41
3. Information Notice 94-57	44
4. Information Notice 95-06	46
5. Information Notice 95-47	48
6. Information Notice 96-59	49
7. Bulletin 93-02及びSupplement 1	50
8. Bulletin 95-02	56
9. Bulletin 96-03	59
付録Ⅱ 規制指針RG-1.82 改訂第2版の抄訳	67
付録Ⅲ NUREG/CR-6224, BWRにおけるLOCA起因のデブリによるECCS ストレーナ閉塞可能性に関するパラメータ評価の概要	94

Contents

1. Introduction	1
2. Suppression Pool and Emergency Core Cooling System at Boiling Water Reactors	2
3. Barsebaeck-2 Event and Subsequent Similar Events at U.S.plants	6
3.1 Barsebaeck-2 Event	6
3.2 Similar Events at U.S.Plants	7
4. Nuolear Regulatory Commission's Responses and Revised Regulatory Guide	16
4.1 Outlines of Guidance Documents	16
4.2 Chronological Responses	16
4.3 Revised Regulatory Guide	23
5. Concluding Remarks	38
References	39
Appendix I Individual Nuclear Regulatory Commission's Guidance Documents	41
1. Information Notice 92-71	41
2. Information Notice 93-34 and Supplement 1	41
3. Information Notice 94-57	44
4. Information Notice 95-06	46
5. Information Notice 95-47	48
6. Information Notice 96-59	49
7. Bulletin 93-02 and Supplement 1	50
8. Bulletin 95-02	56
9. Bulletin 96-03	59
Appendix II Regulatory Guide 1.82 Revision 2	67
Appendix III Summary of NUREG/CR-6224, " Parametric Study of the Potential for BWR ECCS Strainer Blockage Due to LOCA-Generated Debris "	94

1. はじめに

1992年7月28日に、スウェーデンの沸騰水型原子力発電所(BWR)、Barsebaeck-2号炉(ABB-ATOM社製：61.5万kw出力)で、安全弁の誤作動により配管断熱材が脱落し、それがサブプレッションプールに流入して非常用炉心冷却系(ECCS)の吸込ストレーナの閉塞を引き起こすという事象が発生した。この事象は、当事国であるスウェーデンは勿論のこと、我が国や欧州各国、米国のプラント運転や規制に大きなインパクトを与えた。特に、米国では、1970年代後半に、加圧水型原子力発電所(PWR)における格納容器サンプ内スクリーンの閉塞によるECCS再循環失敗、及び、BWRにおけるサブプレッションプール内ストレーナの閉塞による残留熱除去系(RHR)の機能喪失の可能性が重要視され、未解決安全問題(Unresolved Safety Issues：USI A-43)に指定された。その解決策を得るために、数多くの実験及び解析が行われ、その結果を反映して、1985年に規制指針(Regulatory Guide：RG)-1.82が改訂された(改訂第1版)。この時点で、ストレーナ閉塞問題は解決されたものと考えられていた。しかし、Barsebaeck-2号炉の事象発生以後、米国内BWRにおいて、ストレーナの目詰りが発生したり、サブプレッションプール内で異物が発見されるといった事例報告がなされ、米国原子力規制委員会(U. S. Nuclear Regulatory Commission：NRC)はその都度規制関連書簡を発行し、電力会社に注意を促すと共に、いくつかの改善命令を出してきた。

こうした運転経験や、実験的及び解析的研究の成果により、改訂第1版が、ECCS吸込ストレーナのデブリ閉塞によるBWRプラントへの影響を評価するのに不十分であったことが示されたため、1996年5月に、BWRに対するデブリ閉塞評価のガイダンスを変更することを目的として同規制指針の再改訂が行われた(改訂第2版)。この改訂第2版は、新規プラントのみならず、NRCの要求した改善命令に従ってストレーナの設計変更等を実施する際にも適用されることとなった。

原研では、原子力発電所の安全性向上に役立つ情報を提供することを目的として、「事故・故障の分析・評価に関する研究」を実施している。その一環として、Barsebaeck-2号炉の事象とそれ以後米国において発生した類似事例及びNRCの規制関連書簡を収集・整理してきた。本報告書では、その内容をまとめる。第2章では、BWRのサブプレッションプールとECCSについて簡単に記述し、第3章では、Barsebaeck-2号炉の事例と米国における類似事例について事象の概要を述べる。第4章では、ECCS吸込ストレーナ閉塞に関するNRCの対応経緯と規制指針RG-1.82の変更内容について記す。さらに、付録Ⅰ及びⅡでは、NRCが発行した規制関連書簡及び規制指針RG-1.82の改訂第2版の内容をほぼ全訳に近い形で紹介する。また、付録Ⅲには、規制指針改訂の際に参考とされた実験及び解析結果に関するレポートNUREG/CR-6224、”BWRにおけるLOCA起因のデブリによるECCSストレーナ閉塞可能性に関するパラメータ評価”、の概要を示す。

2. 沸騰水型原子力発電所における サブレーションプールと非常用炉心冷却系

沸騰水型原子力発電所(BWR)には、非常用炉心冷却系として、以下の系統が備えられている。

- ・ 高圧注入系(HPCI)あるいは高圧炉心スプレー系(HPCS)
- ・ 自動減圧系(ADS)
- ・ 低圧注入系(LPCI)
- ・ 低圧炉心スプレー系(LPCS)

このうち、HPCI/HPCSは、復水貯蔵タンクを水源とし、トランジェントあるいは小破断LOCA時に原子炉水位を回復・維持する役割を果たす。ADSは、中小破断LOCA時に、原子炉圧力を低下させ、LPCIやLPCSによる冷却材注入を可能とするための設備である。LPCIとLPCSは、サブレーションプールを水源とし、大破断LOCA時あるいは中小破断LOCA後のADS作動時に冷却材を注入し炉心を冷却する。なお、長期にわたって炉心の崩壊熱を除去するために、残留熱除去系(RHR)が設けられているが、この系統では、原子炉冷却材を取り出し熱交換器で冷却した後に原子炉に戻すことにより炉心冷却を行うという運転モード(停止時冷却)、サブレーションプールの水を熱交換器で冷却した後ドライウエルとサブレーションプールにスプレー散水することで格納容器の圧力及び温度の上昇を抑制するという運転モード(格納容器スプレー)、サブレーションプールの水を熱交換器で冷却した後に同プールに戻すことによりプール水温の上昇を抑制するという運転モード(サブレーションプール冷却)等の機能が備えられている。

一方、BWR原子炉格納容器には、図2.1~2.3に示すように、MARK-I、MARK-II及びMARK-IIIという3つの形式があり、それぞれ形状や大きさは異なるものの、基本的な構成や役割は同様である。格納容器は、圧力容器や冷却材再循環ループ等を格納するドライウエルとサブレーションプールを有するウェットウエル(圧力抑制室)から構成され、これらはベント管(ダウンコマ:下降管とも呼ばれる)で連結される。LOCA時に、ドライウエル内に放出された蒸気はベント管を通してサブレーションプールに導かれ、ここで凝縮される。これにより、格納容器の圧力上昇を効果的に抑制することができる。また、主蒸気管に設置されている逃し安全弁(SRV)から放出される蒸気もサブレーションプールにおいて凝縮される(なお、Barsebaeck-2号炉のSRV放出ライン設計は米国BWRと異なり、直接ドライウエル内に蒸気が噴出するようになっている)。さらに、上述したように、サブレーションプールはECCS(崩壊熱除去系も含む)の水源としての役割も果たすため、プール内にはECCSポンプの吸込口が設けられている。この吸込口には、異物がECCSポンプに入り込まないようにストレーナが設置されており、仮に、このストレーナが閉塞すると、ECCS機能の喪失に繋がる可能性がある。

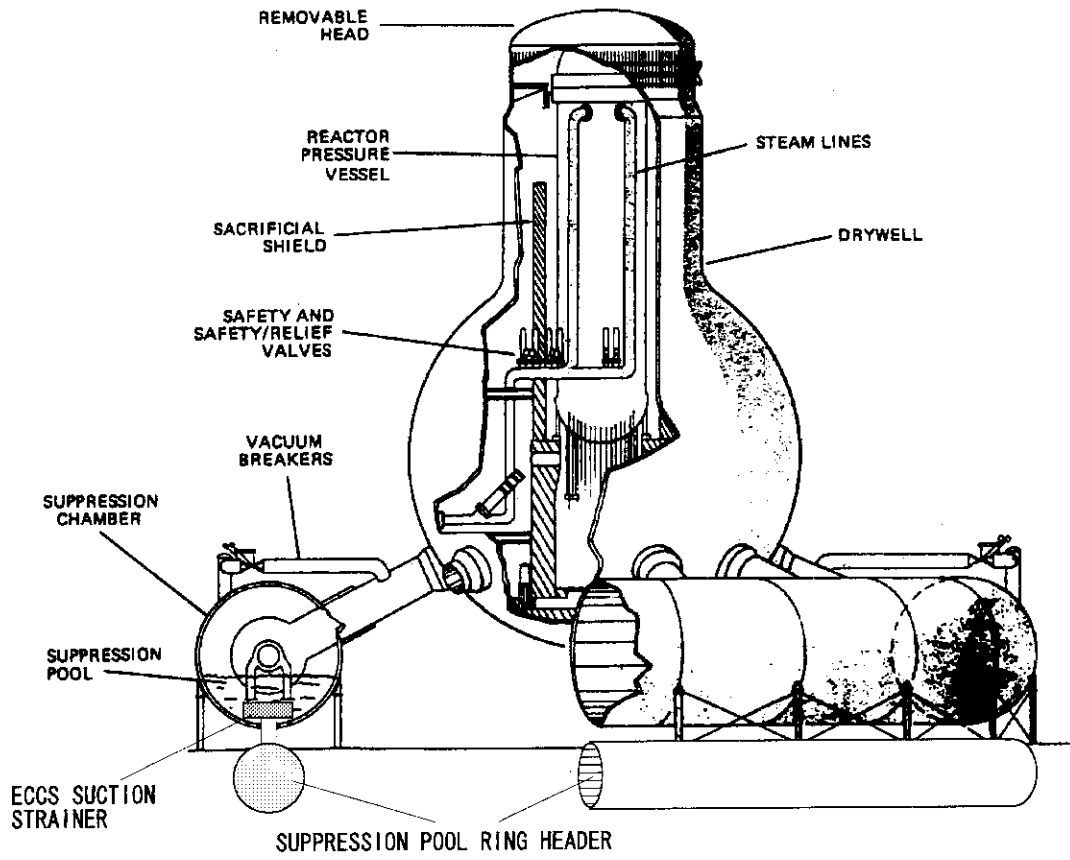


図2.1 BWR MARK-I型格納容器

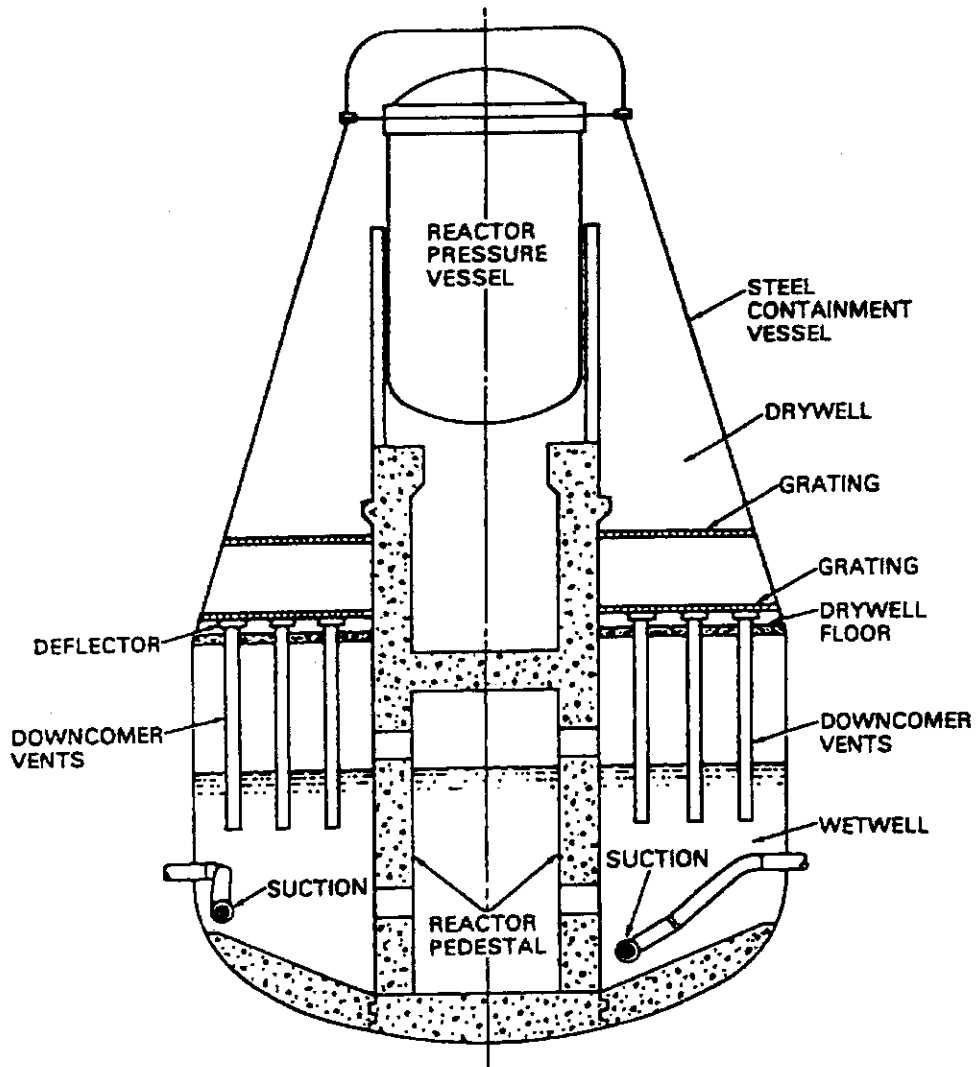


図2.2 BWR MARK-II型格納容器

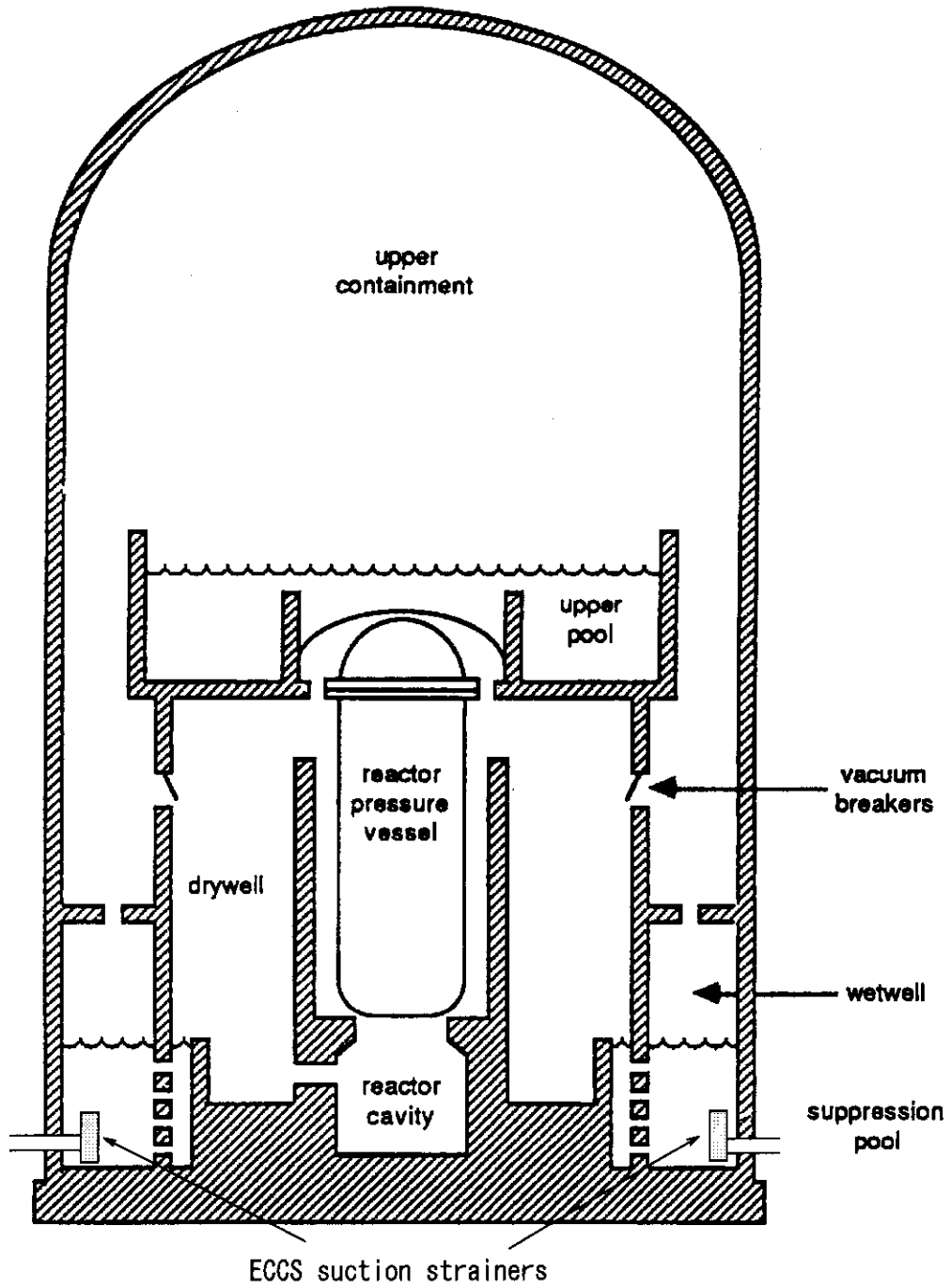


図2.3 BWR MARK-III型格納容器

3. Barsebaeck-2号炉の事例と米国における類似事例

本章では、サブプレッションプールの非常用炉心冷却系(ECCS)吸込ストレーナの閉塞事象を国際的な共通安全問題として提起させたスウェーデンのBarsebaeck-2号炉の事例と、それ以降米国BWRで発生した類似の事例について、事象の概要等を記述する。

3.1 Barsebaeck-2号炉の事例^[1-4]

(1) 事象の概要

1992年7月28日、プラント起動操作中(原子炉出力1-2%、原子炉圧力約30bar)、格納容器ドライウェル内で、主蒸気管に取り付けられた安全弁が突然開いた。吹き出した蒸気により周辺設備の鉍物綿製断熱材(保温材)約200kgが脱落して吹き飛ばされた。そのうちの約100kgは、サブプレッションプール内に流れ込んだ。原子炉はスクラムし、高圧注入系、炉心スプレー系、格納容器スプレー系のポンプが自動起動した。炉心スプレー系及び格納容器スプレー系のポンプは、その吸込がサブプレッションプール中にあり、吸込配管には合計5基のストレーナがある。このうちの2基がサブプレッションプール内に流れ込んだ断熱材により目詰りを起こしたため、ポンプの吸込流量が減少した。約1時間後、運転員は、ストレーナ両側の差圧が大きくなりポンプ1台がキャビテーションの兆候を示していることに気付いた。そこで、ストレーナ部の流れを逆流させ(バックフラッシュ運転)、ストレーナが目詰りの原因となった物質を除去し使用可能な状態に戻した。この間、原子炉水位は通常状態に維持され炉心冷却も適切に行われた。

(2) 事象の原因

事象後に行われた安全弁の分解点検により、最近の保守作業時に行われたパイロット弁の内部機能の調整が不十分であったことが、同弁の誤作動の原因であることが判明した。

(3) 規制当局の対応

スウェーデンの規制当局(SKI:原子力発電検査委員会)は、Barsebaeck-2号炉でストレーナが目詰りが事象発生から約20分に発生し、運転員によるバックフラッシュ運転が必要な状況となったこと、安全評価においてバックフラッシュ運転は事故後10時間は必要ないと仮定していること等を重視した。そこで、1992年9月17日、同国内12基の原子力発電プラントのうち、Barsebaeck-2号炉及び同型の第1世代BWR 4基(Oskarshamn-1, 2, Barsebaeck-1, Ringhals-1)に対して運転停止命令を出した。

(4) Barsebaeck-1, 2号炉での対応

Barsebaeck-1, 2号炉では、9月17日付けのSKIの決定に対して、以下に示すような改善策等を検討・実施した。

- ・ECCS吸込ストレーナの表面積を大きくする。
- ・ECCS配管に使用される断熱材の材質を変更し、さらに、配管への取付方法を強化する。
- ・ストレーナ洗浄のためのバックフラッシュ系が自動的に起動するようにする。
- ・継続的に非常用炉心冷却を行うために、事象発生後初期の段階では、非常用炉心冷却系

の水源を原子炉ホールの燃料取扱プールとし、その後、サブレーションプールを水源とする再循環モードに切り換えるよう設計を変更する。

- ・システムの監視及び運転を行うための技師を当直に加え制御室に配置する。

SKIは、Barsebaeck-1, 2号炉から提出された報告書レビューし、「対策を講じたことにより非常用炉心冷却系及び格納容器スプレー系の信頼性は運転認可の際の安全評価において仮定された水準まで回復している」との結論を出した。この結論は、9月17日にSKIが提示した運転継続の条件を満足したことになり、1993年1月4日付で、次の燃料取替までの運転継続を認める決定が下された。

3.2 米国における類似事例

Barsebaeck-2号炉の事象以降、米国のBWRにおいて、サブレーションプール内のECCS吸込ストレーナの部分閉塞や損傷が認められた事例、あるいは、プール内に種々のデブリが見つかりストレーナ閉塞の可能性が指摘された事例が少なくとも10件報告されている(表3.1参照)。以下では、各事例について事象の概要等を記述する。

3.2.1 Perry炉の事例^[5]

(1) 事象の概要

1992年5月22日、第3回燃料取替停止中(RF03)、水中ビデオカメラによるサブレーションプールの点検を行ったところ、プール床上に様々な異物が見つかり、また、残留熱除去系(RHR)ループ“A”と“B”の吸込ストレーナに埃塵とデブリが蓄積していることが判明した。点検を行った職員は、RHRストレーナの目詰りに気付いたが、要求されていたサーベランスがすべて順調に行われていたためシステムの動作性については疑問を抱かなかった。

1993年1月16日、保守のための停止中、ストレーナの洗浄と点検を行ったところ、RHRループ“A”と“B”のサブレーションプール内ストレーナが、内部固定板の間で流れの方向に沿って内側に脱落し変形していることが判明した。この変形は、通常のポンプ運転時にストレーナが目詰りを起こし過度の差圧が生じたことによるものと判断された。ストレーナが目詰りを起こしていた期間は明確ではないが、RF03時に収録されたビデオテープにより、収録時点では気付かなかった変形が認められた。1993年2月に、サブレーションプールの点検、ビデオ収録及び清掃を行い、分析のためデブリサンプルを回収した。また、変形の認められたストレーナを交換した。

1993年3月26日の原子炉計画外停止後、原子炉圧力は逃し安全弁(SRV)により制御され、また、約2時間、RHRループ“A”と“B”のポンプをサブレーションプール冷却(SPC)モードで運転した。ループ“A”は停止時冷却(SDC)モードに切り替えたが、ループ“B”はさらに5時間SPCモードで継続運転した。1993年4月14日、ビデオカメラを用いて全てのECCSストレーナを点検した結果、ループ“B”のストレーナに目詰りと変形が認められた。しかし、他のストレーナにはこうした兆候は認められなかった。ストレーナに付着したデブリをそのまま放置して、ループ“B”ポンプの動作試験を行い吸込圧力を監視した。吸込側の静圧を9.25psig

表3.1 米国BWRにおいて最近発生したECCS吸込ストレーナ閉塞事象

プラント (格納容器形式)	発生日	発見されたデブリの種類(成分)	ストレーナの状態
Perry (MARK-III)	1992年5月22日	繊維性物質、埃塵等	ストレーナ2基の目詰り
	1993年1月16日	繊維性物質、金属片、腐食生成物	ストレーナ2基の閉塞による変形
	1993年3月26日	繊維性物質(フィルター材)、腐食生成物(酸化鉄)	ストレーナ1基の閉塞による変形
Susquehanna-1 (MARK-II)	N/A	繊維性断熱材、塗料、腐食生成物等	ストレーナ閉塞の可能性が評価によって判明
LaSalle-1 (MARK-II)	1994年4月26日 1994年5月11日	ヘルメット、ホース、タイゴン管、木片、着衣、腐食生成物(酸化鉄)	ストレーナ1基の目詰り
River Bend (MARK-III)	1994年6月13日	ビニール袋、レンチ、ソケット、ボルト/ナット、アンテナ、足場材、ロープ、ハンマー、沈殿物等	ストレーナ1基からビニール袋が発見
Quad Cities-1 (MARK-I)	1994年7月14日	ビニール袋、ワイヤブラシ、金属片、ワシシャー	ストレーナには異常なし(残留熱除去系のポンプ流量の低下、同ポンプと弁からデブリ発見)
Grand Gulf (MARK-III)	1994年4月	ビニール製フィルム、階段の滑り止め	ストレーナ閉塞の可能性が評価によって判明
Browns Ferry-2 (MARK-I)	1994年10月10日	布、吸湿性ペーパータオル	ストレーナ1基で表面の15%閉塞
Limerick-1 (MARK-II)	1995年9月11日	繊維性物質、スラッジ(主成分:酸化鉄)	ストレーナ2基の目詰り(ポンプ吸込圧力の低下が観測)
Nine Mile Point-2 (MARK-II)	1996年10月	泡ゴム製清浄カバナー、ビニール袋、タイゴン管、ヘルメット等	(ストレーナの状態については記載なし)
LaSalle-2 (MARK-II)	1996年10月	ゴム製マット、ガスケット材シート、ナイロン製バッグ、スラッジ(錆状粒子)等	ストレーナの閉塞限界を超えるのに十分な量のデブリが発見

に保った状態で、ポンプを運転したところ、約8時間後ポンプ稼動時の吸込圧力表示が0 *psig*に低下した。ポンプ流量は適切な範囲にあったが、ポンプ保護のため同ポンプを停止した。

1993年4月19日、技術評価を行ったところ、RHR吸込ストレーナ両側の差圧が過度に大きくなりLOCA時あるいはその後長期冷却機能を阻害する可能性のあることが明かとなった。

(2)原因分析

RHRポンプ・ストレーナの性能低下の原因は、サプレッションプールの清浄状態が不適切であったことによるものと考えられている。根本原因としては、清掃管理プログラムにおける要求項目が不適切であったこと、及び、清掃作業に携わっていた職員がECCSの動作性に対する清浄状態の影響を正しく理解していなかったことが挙げられる。ストレーナの設計は要因の一つとは考えられていない。

サプレッションプール内デブリの分析：1992年5月、1993年2月、1993年4月に収録したビデオテープを調べた結果、RHRループ“A”と“B”のストレーナに、繊維性デブリとそれに付着した腐食生成物が認められた。1993年2月11日と14日に、サプレッションプールからデブリを回収したが、2月11日に回収したサンプルには、繊維性物質、金属の小破片、及び、腐食生成物が含まれていた。繊維性物質は、長さ、直径、色、物性も様々であった（繊維は、よじれているもの、色々な方向を向いているもの、まっすぐなもの等、様々な形状をしていた）。金属小破片はアルミニウムと推定されたが、その源は不明である。2月14日のサンプルは、プール床上の別の場所から回収されたものであり、その中には、腐食生成物のみ含まれていた。1993年4月と5月には、ループ“B”の吸込ストレーナから5個のデブリが回収された。これらのサンプルには、繊維性物質、腐食生成物等のデブリが含まれていた。繊維性物質は、ドライウエル冷却系に使用されていた粗フィルターのガラス繊維であった。また、保守時に使用するフィルターを発生源とする繊維性物質も見つかった。さらに、X線蛍光分析により、腐食生成物中に酸化鉄(Fe_2O_3)がかなり検出された。ストレーナは、繊維性物質による一様な被膜を形成しやすい構造となっており、腐食生成物のような浮遊物が表面に付着しやすくなるというフィルター作用の働きがあった。

サプレッションプール清掃・保守の実施方法：サプレッションプールの定期点検作業は適切であったが、容易に監視でき近寄れる場所に限定して行われていた。点検がプール水面上部から行われたため、ドライウエルと格納容器との間にある120本の水平ベントや、ドライウエル壁とサプレッションプール堰との間の領域については定期的な点検が行われなかった。こうした領域は、点検/清掃の要求項目に明記されていなかったし、除外もされていなかった。また、プール床上に置かれていた物体の取除き作業も含まれていなかった。結果的に、1986年に営業運転を開始して以来、サプレッションプールの徹底的な清掃は行われていなかった。さらに、プラント職員は、ECCSのサーベランス試験結果が常に満足するものであったことや、水の純度や化学的性質が常に容認可能な状態であったこと等から、サプレッションプールの状態がECCSの動作性に悪影響を及ぼし得ることを十分に認識していなかった。また、格納容器内に持ち込まれる物質に対しても適切な要求項目がなく、作

業用に持ち込まれた物質が放置され、サブプレッションプール内に流入する可能性があった。こうした問題に対する適切な方針がなかったことも、清掃による機器の動作性への影響に注意が向けられていなかった要因である。

設計適性の評価：ストレーナの設計仕様では、定格流量で目詰りの程度が50%の状況において、ストレーナ両側での圧力損失は1psid未満であるよう要求していたが、設計評価の結果、サブプレッションプールの清掃状態が適切であれば、上記の要求を満足することが判明した。また、設計仕様には明確に記されていないが、ストレーナには適切な構造強度を持たせ、デブリによる破損を防止する設計となっているが、設計流量で50%の目詰りを仮定しても、サブプレッションプールの清掃状態が適切に維持されている限りストレーナの健全性は維持されるものと判断された。

(3)安全解析

RHR吸込ストレーナの設計仕様において、ストレーナのメッシュは、ポンプの遠心分離器やスプレーノズルを閉塞させるのに十分な大きさの異物粒子（3/32インチ球形）を効果的に取り除くことができるよう規定されている。また、吸込ストレーナは、LOCA後100日間運転を継続した後も50%以上の閉塞が起こらないよう設計される。ポンプの最小NPSHを下回ることがないのを担保するために、閉塞率50%のストレーナに対する差圧を用いてNPSHの評価を行う。Perry炉における閉塞率50%のストレーナは設計流量での差圧1psidに対応する。しかし、過去のポンプサーバランス試験データを解析した結果、RHRループ“A”と“B”のストレーナが、1psid以上の差圧条件下で何度も運転されていたことが明かとなった。仮にLOCAが発生していればその後100日間、ストレーナが閉塞率50%以上/差圧1psid以上で使用されていたことになり、RHRポンプの性能が阻害されていた可能性がある。従って、この事象は、安全上重要であると判断された。

(4)対策

再発防止のため、以下の対策を講じることとなった。

1. 格納容器、ドライウエル、及び、サブプレッションプールの徹底的な清掃
2. 格納容器/ドライウエルの清掃管理プログラムの変更
3. サブプレッションプールの点検基準の改良及びサーバランス技術の開発
4. ドライウエル冷却装置等のフィルター材の除去
5. サーバランス時のECCSポンプ吸込圧力の監視及びストレーナの目視点検
6. 系統操作指示書の改訂（RHRポンプのSPCモード時の吸込圧力監視）
7. 原子力技術指示書の改訂（繊維性/プラスチック製の物質の持ち込み管理強化）
8. プラント管理手順書の改訂（サンプリングによる腐食生成物や繊維性物質の分析強化）
9. 各燃料取替停止時におけるサブプレッションプール清掃状態の点検タスクの改訂
（ドライウエルと120本の水平ベントを含むサブプレッションプール全体の点検）
10. 総合運転指示書の改訂（当直長による起動前の格納容器/ドライウエル点検）
11. サブプレッションプール内での異物除去の重要性に関する所内メモの配付
12. 放射線管理訓練の改訂（運転員訓練の導入）

13. 新しいストレーナの設置

3.2.2 Susquehanna-1号炉の事例^[6]

設置者であるペンシルベニア電力会社は、格納容器内での配管破断の結果として脱落し得る繊維性デブリと、それに付着する腐食生成物がECCS吸込ストレーナに及ぼす影響について評価を行った。その結果、デブリの発生源は、繊維性断熱材、塗料、腐食生成物等様々で、これらは格納容器内に存在し、冷却材の供給や格納容器冷却機能の遂行時にECCSポンプの吸込ストレーナに運ばれる可能性があることが判明した。こうした状況を評価するために種々の仮定がなされるが、その中には、以下のような不確定な要因がある。

- ・配管破断による影響
- ・断熱材の損傷程度
- ・物質のウェットウェルへの移送
- ・ストレーナ流量に対する断熱材の影響
- ・格納容器内における他の異物の存在量

この評価による最終的な結論はまだ出ていないが、この問題が共通原因故障による安全上の重要性を含んでいることは明かである。

これまでに実施した対策は、以下の通りである。

- ・デブリの存在量を推定するための格納容器内の巡回点検
- ・繊維性断熱材の被覆及び吸込ストレーナの改良に関する検討
- ・塗料の存在量の推定
- ・ウェットウェル内の腐食生成物の除去

さらに、抜本的な改善策が採られるまでの間、長期冷却機能の維持を担保するために吸込ストレーナに対するバックフラッシュ運転の手順書が策定された。

3.2.3 LaSalle-1号炉の事例^[7]

1994年4月26日と5月11日、燃料取替時に、設置者は、ECCS吸込ストレーナから、1%未満の閉塞の原因となった少量のデブリを取り除くために、MARK-II型格納容器のサブプレッションプールの潜水清掃を2度行った。ダイバーは、同ストレーナの損傷や変形のないことを確認した。しかし、プール内に多種多様のデブリが見つかったため、それらを除去した。最初の潜水清掃では、ヘルメット、汚染防止用の着衣、15.2m長のタイゴン管、ナット3個と4.6m長のダクト用テープが見つかり、また、2度目の潜水清掃では、8~46m長の1.9cm口径ホース4本、6~15m長のタイゴン管3本、5cm×10cmの木片及び懐中電灯が発見された。さらに、サブプレッションプールの床上には、0.3~5cm厚の沈澱が認められた。サブプレッションプール床は、基本的には水平であるが、その表面には所々格子状の隆起がある。その隆起部には、5cm厚の沈澱が見つかった。設置者は、沈澱物の一部をサンプルとして分析を行った結果、濾過性の固体の成分は99%以上が酸化鉄であり、微量のニッケル、銅とクロムも含まれていることが判明した。濾過液には、120ppb (parts per billion) の

ニッケル溶液が含まれていた。有機成分は検出されなかった。放射性物質の観点からは、Co-60が75%で、Mn-54、Co-58とFe-59が極僅かながら含まれていた。設置者は、この沈澱物が、油成分や溶剤等を含まない通常の腐食生成物であると結論づけた。プラント起動前に、全てのECCSストレーナからデブリを除去し、また、プール内で見つかった異物を全て取り除いた。

3.2.4 River Bend炉の事例^[7]

1994年6月13日、燃料取替中、設置者は、ECCSストレーナとMARK-III格納容器型サブプレッションプールの点検を行った。その結果、プール内に16個の異物が見つかった。そのうちの1個はビニール袋であり、RHR吸込ストレーナ“A”で発見された。他の異物は、ハンマー、砥石車、レンチ、ソケット、ホース留め金、ボルト、ナット、パッド、インクペン、アンテナ、足場材（ナックル）、ロープ切れ端、使用済みテープ等であった。これらの多くは、サブプレッションプール内における作業時の遺失物リストに記録されていないものであった。設置者は、対応措置として、(1)サブプレッションプールからの異物除去、(2)他の箇所のデブリ点検、(3)ECCSポンプストレーナの清掃確認、及び、(4)新たな異物の落下を防止するためのサブプレッションプール作業エリアのサーベランス強化を行った。設置者は、格納容器内の格子エリア付近における遺失物に関し、自らの方針と実施方法をレビューしている。さらに、サブプレッションプール内には沈澱物も認められた。前回の燃料取替時(1992年9月に終了)に、サブプレッションプールの排水と清掃が行われたが、清掃は完全ではなく、排水後、堰の内側に約30cm高さの泥状の水が残っていた。今回の燃料取替の際には、プール水の清掃に可搬式の浄化設備を用いており、プール水の静澄度は著しく改善された。しかし、沈澱層は未だプール床面上に残っている。現在、常設のプール水浄化系の設置が計画されている。しかし、このシステムでも堰内側の沈澱物を除去することはできないと考えられている。

3.2.5 Quad Cities-1号炉の事例^[7]

1994年7月14日、RHRループ“A”の保守後試験中、試験データにより、RHRのサブプレッションプール冷却モード注入弁（テスト用戻り配管上の弁）の閉塞が判明した。検査のため同弁を分解したところ、ビニール袋の切れ端が、最近取り付けられたキャビテーション防止トリムに引っかかっているのが見つかった。大部分はトリムの吸込側に引っかかっていたが、一部はトリムを完全に通り抜けていた。少量のビニール袋がMARK-I型格納容器のサブプレッションプールで見つかったため取り除かれた。その後、RHRポンプ“C”の流量低下が認められたため調査を行った。7月23日、保守員が同ポンプのうず形室からドレンプラグを取り除き、ボロスコープを用いてポンプ内部を検査した。その結果、10cm口径のワイヤブラシと金属片が羽根車の廻りで見つかった。設置者は、共用の吸込配管上のバタフライ弁を外し、同ポンプから、ワイヤブラシ、金属片とワッシャー2個を取り出した。

3.2.6 Grand Gulf炉の事例^[8]

1994年4月、格納容器内で使用されているビニール製のラップ及び類似の物質による安全系ストレーナの閉塞の可能性が評価された。この評価では、作業員の放射線防護区域と乾燥器／気水分離器の支持縦桁を覆う薄いビニール製フィルムが対象とされた。ビニール製のフィルムは汚染の拡大防止用に用いられてきたものであり、LOCA時に格納容器スプレー系の作動により外れサブプレッションプールに移送される可能性がある。設置者は、ECCSストレーナ閉塞を引き起こし得る格納容器内物質の検査を行った。検査では、燃料取替用機器の覆いに用いられるビニール製フィルムに重点が置かれた。乾燥器／気水分離器の支持縦桁からビニール製フィルムを取り外しLOCA時に耐え得るものと交換することとなった。設置位置の関係で、作業員の放射線防護区域を覆うビニール製フィルムはサブプレッションプールには流入しないものと判断され、そのまま使用されることとなった。また、階段の滑り止めについてもストレーナ閉塞の可能性が評価された。この滑り止めは、汚染防止の観点から、放射線管理区域出口に取り付けられており、床にテープで固定されている。設置者は、この滑り止めは格納容器スプレー系の作動により剥がれることはないとは判断したが、その可能性を極力抑えるために、その後の作業で必要でないものは取り外すこととした。

3.2.7 Browns Ferry-2号炉の事例^[8]

1994年10月10日、サブプレッションプール内の検査を行ったところ、プール床と非常用炉心冷却系(ECCS)ストレーナ表面から布切れが多数見つかった。そのほとんどは、 25cm^2 程度のものであった。ビデオカメラによりプール内の状態を調べたところ、あるストレーナではその表面の約15%が閉塞していることが判明した。発見された物質は、保守や清掃時に用いられる吸湿性のペーパータオルの切れ端であった。サブプレッションプールの検査により多数のペーパータオルとテープが見つかったため、設置者は、プールとストレーナの清掃を行い、それらの物質を取り除いた。合計で約 1m^2 の物質が除去された。ストレーナ4基の総面積は 3.7m^2 であるが、仮に、取り出された物質が全てストレーナ表面に付着すればストレーナ表面の約25%が閉塞することになる。ビデオテープにより、ストレーナ1基から約15%の部分閉塞が認められたが、設置者の計算によれば、ストレーナが約65%まで閉塞しても所定の流量が保証される。設置者は、サブプレッションプールへの物質の流入経路として、(1)作業員通用口、(2)真空破壊装置ベント、及び、(3)サブプレッションプールのダウンカムベント、を同定した。設置者による対策は、以下の通りである。

- ・(2)及び(3)については、近辺での作業はカバーを取り付けてから行うこととした。
- ・(1)については、物質管理記録をレビューし、いくつかの問題点が明らかとなった。例えば、物質管理記録にはサブプレッションプールに持ち込まれるタオルのバッグが明記されていたが、持ち込まれたタオルの量及び使用されたタオルの量は記入されていなかった。そのため、設置者は、物質管理手順の強化を指示する所内警告を発令すると共に、異物除去手順のレビューを行うこととした。

3.2.8 Limerick-1号炉の事例^[9,10]

1995年9月11日、100%出力運転中、Limerick-1号炉の制御室で、逃し安全弁(SRV)1個(SRV-"M")が開いたのを示す警報表示が発せられ、緊急時手順が実行された。同弁を閉じようとする試みがなされたが成功せず、2分以内に手動スクラムが開始された。原子炉のクールダウン速度を下げるために、主蒸気隔離弁(MSIV)が閉止された。クールダウン速度の最大値は54°C/hrであった。SRVが開く前、設置者は、SRVの漏洩によりサブプレッションプールに放出された熱を除去するため、RHRループ"A"によるサブプレッションプール冷却を行っていた。スクラム直後、SRVが開いた状態で、RHRループ"B"によるサブプレッションプール冷却が始められた。運転員は、SRVを閉じて原子炉クールダウン速度を低下させる努力を続けた。約30分後、ループ"A"でモータ電流と流量の変動が認められた。キャビテーションが起こったものと考えられ、同ループが停止された。ポンプ"A"を調べた後、再起動させたが、流量は定格流量の極く僅かに値する8kl/minであった。特に問題が認められなかったため、流量を徐々に32kl/minまで増やし、一定流量でポンプ運転を継続した。ポンプ吸込側の圧力ゲージが徐々に低下するのが観測された。この原因は、サブプレッションプール内のポンプ吸込ストレーナ部で圧力損失が増加したことによると考えられた。その約30分後、吸込圧力は落ち着いた。なお、このプラントには、Target Rock社製の2段縦置型SRVが設置されている。この弁の設計は、Limerickに特有の特殊のもので、復水が主弁の弁座に集まるようになっており、主弁の漏洩問題が頻繁に起こる原因であると信じられている。他のプラントでも類似の設計のTarget Rock社製SRVが用いられているが、復水が弁座に集まらない横置型のものである。復水の排水を促進するよう弁体の変更が行われてきたにも拘らず、主弁の弁座からの漏洩問題は依然残っていると考えられた。

原子炉のクールダウン後、サブプレッションプール内に潜ってストレーナの状態とサブプレッションプール内の清掃状態を検査した。ループ"A"の吸込ストレーナは2基とも繊維とスラッジから成るマット状の膜で覆われていた。ループ"B"のストレーナも同様の膜で覆われていたが、その程度はループ"A"ほどひどくなかった。ループ"B"のストレーナ1基は約75%が膜で覆われていたが、もう一方は極く僅かの範囲であった。プール内の他のストレーナには、腐食生成物(スラッジ)が付着していた。そのため、ストレーナとプールからデブリを取り除き、仮設のフィルターを用いてプール水の洗浄を行った。

SPCの作動中、ストレーナのフィルター作用によりプール水中の繊維が表面に付着したものと考えられる。この付着した繊維がフィルター作用を助長しスラッジやその他の物質をストレーナ表面上に集めたものと思われる。設置者は、SRVの開によるブローダウンがストレーナ表面でのデブリ堆積を促進させたのではないと結論づけた。事象後、1号炉のプールから約635kgのデブリが除去されたが、これは、以前に2号炉のプールから除去された物質の量と同等であった。

分析により、スラッジは主として酸化鉄であり、また、繊維性物質は高分子量の化合物であることが判明した。繊維性物質の発生源は、同定されていないが、サブプレッション

プールに当初から存在していたものではないと判断されている。繊維ガラスやアスベスト繊維の痕跡はなかった。さらに、プール内では他の異物(木片、釘、ホース等)も見つかった。このため、設置者は、サブプレッションプール及びドライウェル内の物質管理を強化するため異物除去方法を改良することとした。

3.2.9 Nine Mile Point-2号炉の事例^[11]

1996年10月、Nine Mile Point-2号炉の設置者であるNiagara Mohawk電力は、NRCのBulletin 95-02 (1995年10月17日発行)における要求に従って、ドライウェルとサブプレッションプール間の下降管(ダウンコマ)の検査を行っていた。その結果、下降管から大量のデブリが見つかった。デブリの検出された下降管は17本であったが、そのうちの7-8本は原子炉容器の真下に位置しており、開口部には清浄カバー(泡ゴム製)が取り付けられていた。デブリの一部は、下降管内部の水面上に浮遊しており、清浄カバー、ビニール袋、タイゴン管、ヘルメット等から構成されていた。なお、サブプレッションプールの清掃は、前回の燃料取替時に行われていた。

3.2.10 LaSalle-2号炉の事例^[11]

1997年10月、LaSalle-2号炉の設置者であるCommonwealth Edison電力は、NRCのBulletin 95-02 (1995年10月17日発行)における要求に従って、サブプレッションプールの徹底的な清掃作業を実施した。その結果、スラッジ(炭素鋼配管から生じる錆状粒子)層の下にかなりの量の異物が見つかった。また、同様の異物は下降管からも検出された。これら異物には、スラッジの他に、ゴムマット、ガスケット材シート、ナイロン製バッグ等が含まれていた。設置者は、ECCSストレーナの閉塞に関する限界値を上回るのに十分な量のデブリが存在しているものと結論づけた。なお、同炉のサブプレッションプールは、以前の清掃・検査において、デブリの除去やストレーナの洗浄も行われていた。

4. 米国原子力規制委員会の対応と規制指針の変更

Barsebaeck-2号炉で非常用炉心冷却系(ECCS)吸込ストレーナの閉塞事象に対して、米国原子力規制委員会(NRC)は、1992年9月30日にInformation Notice^[1]を発行し、米国内のプラント設置者に対して注意を促した。この時点では、Barsebaeck-2号炉と米国BWRとで設計が異なるため、設計上の関連を正確には把握できなかった。しかし、その後、米国BWR、Perry炉において、デブリによるストレーナの閉塞・変形が認められる等類似の事象が発生したため、この種の事象の重要性に鑑み、NRCは数多くの規制関連書簡を発行すると共に、規制指針を改訂した。本章では、規制関連書簡の発行を通してNRCがどのような対応を取ってきたかについて述べる。なお、表4.1に、Barsebaeck-2号炉の事象発生以後現在に至るまで(1992年7月～1996年末)に、米国BWRで発生した事象とNRC発行の規制関連書簡を時系列的にまとめる。

4.1 規制関連書簡の概要

米国原子力規制委員会(NRC)は、原子力プラントにおいて発生した事故・故障等の運転経験に基づいて、発生防止のための勧告や要請事項などを検討し、その結果を規制関連書簡(ガイダンス文書)としてまとめ各プラント設置者に提供している。規制関連書簡には、以下の3種類がある。

- ・ Information Notice (IN) : INは、安全上重要な問題及びそれに関連する事象について、設置者に情報提供を行うためのものである。各設置者は、その情報が各々の施設に適用可能であるか否かを検討し、類似の事象あるいは安全上の問題の発生を防止するための対策を講じるよう期待される。しかし、INに記載される勧告や改善策の提言内容はNRCの要求ではなく、従って、INに対して具体的な対策を採ることや書簡による対応は要求されない。
- ・ Generic Letter (GL) : GLには3つの目的がある。第1の目的は、新規の規制要求を実施する上で行うべき改善項目を設置者に通達することである。第2の目的は、NRCが規制を行う上で必要となる情報の提供を設置者に求めることである。第3の目的は、具体的な対策を講じその結果を報告するよう設置者に求めることである。
- ・ Bulletin (BL) : BLは、設置者に具体的な対策を講じるよう要求するためのものであり、さらに、その内容をNRCに書簡にて報告するよう要求する。なお、BLでの要求は、設置者に義務づけられるものとなる。

4.2 対応経緯

PWRにおけるLOCA後のECCS再循環は格納容器サンプを水源としているため、格納容器サンプの重要性は古くから認識されており、その設計はPWRの格納容器設計の段階で検討されていた。特に関心が持たれたのは、空気の侵入や渦の発生によるECCSポンプ性能の低下であったが、断熱材デブリの発生及びそれによるサンプの損傷や流路閉塞についても検討が

表4.1 米国における最近の事例と規制関連書簡

1992年7月28日	Barsebaeck-2 : ECCS吸込ストレーナの閉塞 (3.1節参照)
1992年9月30日	Information Notice 92-71発行 Barsebaeck-2号炉で発生したストレーナ閉塞事象の概要を紹介すると共に、「ストレーナ閉塞によるリスクは、米国内プラントにおけるバックフィットを必要とするものではない」という従来結論を再検討する予定である旨、設置者に伝えている。
1993年1月16日	Perry : RHR吸込ストレーナの目詰り及び変形 (3.2.1項参照)
1993年4月14日	Perry : ECCS吸込ストレーナ目詰り及び変形 (3.2.1項参照)
1993年4月26日	Information Notice 93-34発行 Perry炉における上記2回の事象と1992年5月に見つかったRHR吸込ストレーナのデブリ付着、1988年3月と1989年7月にGrand Gulf炉で発生したストレーナ閉塞によるRHR流量低下事象、及び、North Anna-1号炉(PWR)におけるECCSポンプNPSH(有効吸込水頭圧)低下の可能性について紹介すると共に、閉塞の原因となるデブリの発生を通常運転時及びLOCA時の両フェーズにおいて評価することの必要性を通知している。
1993年5月6日	Information Notice 93-34, Supplement 1発行 IN 93-34発行後に行われたPerry炉の事象原因の分析結果について論じている。また、その結果に基づき、未解決安全問題USI A-43の解決策が、ストレーナ表面におけるデブリのフィルター作用について十分に言及していないことを示唆している。
1993年5月11日	Bulletin 93-02発行 本Bulletinでは、軽水炉におけるLOCA後のECCS再循環フェーズでのNPSH喪失の可能性について、これまでに認識されていない寄与因子を通知すると共に、設置者に対して、格納容器内に設置されている繊維性物質のうち、LOCAに耐えられるように設計されているものを同定し取除く等の対策を採るよう要求している。
1993年6月11日	Susquehanna-1 : ECCS吸込ストレーナ閉塞の可能性 (3.2.2項参照)
1994年2月18日	Bulletin 93-02, Supplement 1発行 本Bulletinでは、スウェーデン等の欧州諸国が行った実験/解析結果と、USI A-43の解決策の一部であるNUREG/CR-2982改訂版の情報を比較して得られた見解を示している。また、設置者に対して、ストレーナ閉塞の可能性に関する情報の伝達、緊急時運転手順書の拡充(ECCSストレーナ閉塞事象の緩和のためのガイダンスの用意等)、LOCA時におけるNPSH裕度喪失の防止・遅延・緩和のための対応策定、といった暫定措置を行うよう要求している。

表4.1 米国における最近の事例と規制関連書簡 (続き)

1994年4月	Grand Gulf: ビニール製フィルムによるECCS吸込ストレーナ閉塞の可能性 (3.2.3項参照)
1994年4月～5月	LaSalle-1: サプレッションプール内でのデブリ発見 (3.2.4項参照)
1994年6月13日	River Bend: サプレッションプール内でのデブリ発見 (3.2.5項参照)
1994年7月14日	Quad Cities-1: RHR弁の閉塞 (3.2.6項参照)
1994年8月12日	Information Notice 94-57発行 LaSalle-1号炉, River Bend炉, Quad Cities-1号炉で発生した事象を紹介すると共に、プール内に蓄積された腐食生成物がフィルター作用の働きのある物質 (例えば、汚染防止用の覆い) に吸着し、さらにストレーナ表面に付着することによりストレーナが閉塞する可能性を論じている。
1994年10月10日	Browns Ferry-2: サプレッションプール内での布切れの発見 (3.2.7項参照)
1995年1月25日	Information Notice 95-06発行 Grand Gulf炉, Browns Ferry-2号炉, Palisades炉 (PWR) の格納容器内でビニール製の物質が多数見つかったという事象を紹介すると共に、格納容器内での作業時に使用が許されている物質がプール内に流入しストレーナの閉塞を引き起こす可能性を論じている。
1995年7月	Bulletin 95-xx (Draft for Comment)発行 本ドラフトでは、1992年のBarsebaeck-2号炉事例と1993年のPerry炉事例を紹介すると共に、BWR所有者グループ (BWROG) による評価結果を基に、設置者に対して、ストレーナ表面積の拡大、ストレーナ表面の洗浄機能を有するストレーナの設置、あるいは、バックフラッシュ機能の設置のいずれかの措置を講じるよう要求している。なお、本ドラフトに対して提出されたコメントをレビューし改訂した後、Bulletin 96-03として、1996年5月に正式に発行された。
1995年9月11日	Limerick-1: RHR吸込ストレーナの部分閉塞 (3.2.8項参照)
1995年10月4日	Information Notice 95-47発行 Limerick-1号炉の事例を紹介すると共に、繊維性物質がストレーナのフィルター作用を助長し、ストレーナの閉塞を促進させる可能性を指摘している。
1995年10月17日	Bulletin 95-02発行 本Bulletinでは、Limerick-1号炉の事例を紹介すると共に、BWR設置者に対して、サプレッションプールから取水するポンプ (ECCSや格納容器スプレー等) の作動性能評価、サプレッションプールの定期的な清掃プログラムの策定、サプレッションプールやドライウエルからの異物除去方法と実施状況のレビュー、プール水のサンプリングやポンプ吸込圧のモニタリング等の測定方法の検討を行うよう要求している。

表4.1 米国における最近の事例と規制関連書簡 (続き)

1996年5月6日	<p>Bulletin 96-03発行</p> <p>本Bulletinでは、1992年のBarsebaeck-2号炉事例、1993年のPerry炉事例及び1995年のLimerick-1号炉の事例を紹介すると共に、BWR所有者グループ(BWROG)による評価結果、OECD/NEAにおける検討結果、及び、NRCが行った評価の結果を基に、設置者に対して、ストレーナ表面積の拡大、ストレーナ表面の洗浄機能を有するストレーナの設置、あるいは、バックフラッシュ機能の設置のいずれかの措置を講じるよう要求している。なお、本Bulletinは、1995年7月発行のドラフト (Bulletin 95-xx) に最新の情報を盛り込んだ形で発行された。</p>
1996年5月	<p>Regulatory Guide 1.82 Revision 2 (改訂第2版) 発行</p> <p>本規制指針 (規制指針1.82 : Regulatory Guide 1.82) は、近年の運転経験 (事故・故障事例)、実験や解析の研究成果により、同指針の改訂第1版が、ECCS吸込ストレーナのデブリ閉塞によるBWRプラントへの影響を評価するのに不十分であったことが示されたために、BWRにおけるデブリ閉塞評価ガイダンスの変更を目的として改訂された。本指針では、PWRの格納容器非常用サンプ並びにBWRのサブプレッションプールを対象としたものであるが、改訂第2版では、BWRへの適用項目がほぼ全面的に変更となった。</p>
1996年10月16日	LaSalle-2 : サプレッションプール内でのデブリ発見 (3.2.10項参照)
1996年10月17日	<p>Nine Mile Point-2 : サプレッションプール内でのデブリ発見 (3.2.9項参照)</p>
1996年10月30日	<p>Information Notice 96-59発行</p> <p>LaSalle-2号炉及びNine Mile Point-2号炉の事例を紹介すると共に、徹底したサブプレッションプールの清掃、並びに、ドライウェルや関連設備からの異物除去を行うことの重要性と、そのための検査手順書変更 (強化) の必要性を指摘している。</p>

なされた。

1974年には、規制指針 (Regulatory Guide : RG) -1.82^[12]が出され、その中で、サンプの設計・製作・試験に関する要求項目を満たすための評価方法が示された。このRG-1.82では、PWRだけが対象とされており、サンプの位置や形状、スクリーンの構造や設置方法、考慮すべきデブリの種別 (重いものと比較的軽いものとに分類) 等を示すと共に、スクリーンの閉塞基準を50%としてポンプの性能を評価することとしていた。しかし、その後も、格納容器内に設置される断熱材のデブリ化及びそれによるサンプの閉塞、サンプ内での渦の発生やポンプへの空気の侵入等によるECCS再循環失敗の可能性に対する懸念は消えず、NRC内において、サンプ性能を確保することの重要性の認識が高まっていった。

1979年に、この問題は、未解決安全問題(USI) A-43、「格納容器非常用サンプ性能」と指定され、その後、問題解決のために数多くの実験や解析が行われた。それらの結果を基に解決策が検討され、1985年に、その内容がNUREG-0897^[13]及びNUREG-0869^[14]として公表された。併せて、RG-1.82も改訂された (RG-1.82改訂第1版)^[15]。主な改訂内容は、

- (1) PWRの格納容器サンプに加えてBWRのサブプレッションプールも適用対象となったこと、
- (2) 考慮すべきデブリの種別を詳細化すると共に、デブリの発生、移送及びそれによるスクリーン (ストレーナ) 閉塞を解析してポンプ性能を評価することの必要性を明記したこと (50%というスクリーンの閉塞基準を削除し保守的に評価することとしている)、
- (3) サンプの水力的性能や設計指針に関する検討項目を追加したこと、

等である。さらに、NRCは、Generic Letter (GL) 85-22^[16]を発行し、その中で、USI A-43の解決策に関し、「デブリによるストレーナ閉塞は、設置されている断熱材の種類や量、一次系の配置、LOCA後の再循環流量等に依存するため、プラント固有の評価を行う必要がある」等の技術的見解を示した。また、このGLでは、設置者に対して、RG-1.82改訂第1版は新規プラントの設計や建設の許認可に適用するものとし、既設プラントに対しては新たな要求を課さないことを通知した。その一方で、原子炉冷却系配管や機器の断熱材を変更する際には、この改訂第1版を評価ガイダンスとして利用するよう勧告した。この時点で、USI A-43は解決されたものと結論付けられた。

1985年以降、NRCは、関連する事象の発生に伴い、いくつかの書簡を発行してきたが (Information Notice 88-28^[17], 90-07^[18])、これらでは、新たな規制上の要求を課していなかった。

1992年にスウェーデンのBWR、Barsebaeck-2号炉において、SRVの誤開放に伴う配管断熱材の脱落及び移送により、サブプレッションプール内のECCSストレーナが閉塞するという事象が発生したが、この事象に対しても、米国BWRとの設計上の相違点による影響の程度が十分に把握できないとして、Information Notice 92-71^[1]を発行しただけに留めた (1992年9月発行)。しかし、1993年にPerry炉においてECCSストレーナの閉塞・変形が認められたのを機に、新たな規制要求の必要性が認識され、NRCは、Information Notice 93-34^[19]及びSupplement 1^[20]を発行する共に (1993年4-5月発行)、Bulletin 93-02^[21] (1993年5月発行)を通して、設置者に対して、以下の対策を講じるよう要求した。

- ・ 一次格納容器内に設置されている繊維性エアフィルターや、繊維性物質を用いた仮設材で、LOCAに耐えられるように設計されていないものを明らかにすること。
- ・ ECCSの性能を担保するための対応策を早急に講じること。
- ・ 上記に示したような繊維性物質を早急に取除くこと。

Bulletin 93-02の発行に引続き、NRCは、米国内の全BWRに対して、駐在検査官からの設計情報等を基に粗い評価を行い、その結果、大破断LOCAシナリオにおいては、ECCSポンプのNPSH（有効吸込水頭圧）が喪失する可能性のあることが判明した。さらに、NRCは、スウェーデンや欧州諸国がBarsebaeck-2号炉事象に関連して行った解析や実験の結果と、USI A-43解決策の検討に用いられたNUREG/CR-2982改訂版^[22]における結果を比較した。その結果、当時米国で行われた実験において使用された断熱材の破損メカニズムが大破断LOCA後のシナリオを十分に反映していない可能性があり、また、NUREG-0897で取り上げているような配管破断で生じる蒸気ジェットにより生成されるデブリの量を過小評価していることが明かとなった。また、Perry炉の事例では、小さな粒子であっても、デブリによるフィルター作用と相まってストレーナ部での圧力損失を増加させることが示された。これらの見解は、Bulletin 93-02 Supplement 1(1994年2月発行)^[23]に述べられている。また、このSupplementでは、設置者に対して以下の暫定措置を行うよう要求している。

- ・ 本Bulletin及び関連のInformation Noticeにおけるサブプレッションプール内ストレーナ閉塞の可能性に関する情報を、運転員や他の関係者（緊急時対応のための職員）に伝えるための訓練や文書を用意すること。
- ・ 緊急時運転手順書により運転員がECCSストレーナの閉塞に気付くことができるのを確認し、さらに、緩和のためのガイダンスを用意すること。
- ・ LOCA時にNPSH裕度の喪失を防止、遅延、緩和させるための対策が分かるよう手順書や対応を策定すること。

その後、NRCは、LOCA時に発生するデブリのNPSHへの影響をより正確に評価するために、BWR-4を対象にプラント固有の評価を行った。その結果は、NUREG/CR-6224^[24]に纏められている。この評価により、LOCAの際に生じる断熱材デブリが吸込ストレーナに移送されるとECCSポンプのNPSH裕度を適切に保てなくなる可能性が大きいことが示された。また、事象発生後10分以内にNPSHが喪失する可能性のあることも明かとなった。

これを受けて、NRCは、1995年7月、Bulletin 95-xx(Draft for Comment)^[25]を発行し、以下のいずれかの対策を講じるよう設置者に要求することを計画した。

- ・ 大容量受動的ストレーナの設置（ストレーナ表面積の拡大）
- ・ 洗浄機能を有するストレーナの設置（ブラシ等によるストレーナ表面の洗浄を継続的に行う機能を持つストレーナの設置）
- ・ バックフラッシュ系の設置（ストレーナ部での流れを逆にして表面からデブリを取り除く装置の設置）

この間にも、1994年4月にLaSalle-1号炉で、6月にRiver Bend炉で、7月にQuad Cities-1号炉でサブプレッションプールやRHR系内でデブリが発見されたため、Information

Notice 94-57^[7]を発行し(1994年8月発行)、設置者に注意を促した。また、1994年4月にPalisades炉(PWR)とGrand Gulf炉で、1994年10月にBrowns Ferry-2号炉で、格納容器内で使用されているビニール製物質がストレーナ閉塞を引き起こす可能性が明かとなったため、Information Notice 95-06^[8]を発行し(1995年1月発行)、この中では、通常時あるいは保守作業時に汚染防止の観点から使用が認められているビニール製物質の管理強化の重要性を論じた。

さらに、1995年9月にLimerick-1号炉でRHR吸込ストレーナの部分閉塞によりRHR流量が低下するという事象が発生したため、Information Notice 95-47^[9]を発行し(1995年10月発行)、繊維性物質がストレーナのフィルター作用を助長しストレーナの閉塞を促進させる可能性を指摘すると共に、1995年10月には、Bulletin 95-02^[26]を発行し、以下の対策を講じるよう設置者に求めた。

- ・ サプレッションプール及びストレーナの清掃状態に関する評価を基に、サプレッションプールから取水するポンプ(ECCSや格納容器スプレー等)の安全機能遂行時における作動性能を確認すること。清掃状態の評価は、プール及びストレーナに対する直前の検査あるいは清掃時の状態と、ストレーナの閉塞を引き起こし得るデブリの流入の可能性に基づいて行うものとする。なお、作動性能は、本Bulletinの発行から120日以内に、適切な試験及び検査を行うことによって確認するものとする。
- ・ サプレッションプール清掃を計画すること。さらに、定期的な清掃プログラムを策定するものとし、その中には、清掃の方法、適切な清掃頻度の決定基準、及び、清掃程度の適性評価基準を含めるものとする。
- ・ サプレッションプール、ドライウェル及び接続する系統内の物質管理が適切か否かを判断するために、異物除去方法及びその実施をレビューすること。このレビューでは、ECCSの作動に影響を及ぼし得る物質がプール内に流入するのを防ぐために適切な異物除去管理が行われてきたか否か、また、作業員がそれぞれの責務を十分周知していたか否かを検討するものとする。
- ・ プール水のサンプリングやポンプ吸込圧のモニタリング等の測定方法を新たに検討すること。

1996年5月、Bulletin 95-xx発行以後の事例を反映して同Bulletinを改訂し、正式にBulletin 96-03^[27]を発行した。ここでは、Barsebaeck-2号炉及びPerry炉の事例の他、最近の事例として1995年9月に発生したLimerick-1号炉の事例を取り上げ、断熱材以外の繊維性物質によるストレーナ閉塞の可能性を示唆すると共に、ドラフト版(Bulletin 95-xx)で計画した対策を講じるよう設置者に要求した。また、同時に、規制指針RG-1.82を改訂した(改訂第2版)^[28]が、この中で、BWRにおいて使用可能なECCSストレーナのタイプ、デブリの生成量、発生源、移送及びストレーナ閉塞に関する評価方法や仮定等を評価ガイダンスとして規定した。また、改訂第2版は、Bulletin 96-03において要求された対策を講じる際にも、この評価ガイダンスを適用するよう義務づけている。

Bulletin 95-02の発行以後、その要求に従って、各プラントでサプレッションプールの

清掃状況の検査等が行われたが、1996年10月に、LaSalle-2号炉及びNine Mile Point-2号炉において、従来の清掃において検査が不十分であった領域からかなりの量のデブリが発見されたとの報告を受けて、Information Notice 96-59^[11]を発行し（1996年10月発行）、サブプレッションプールの清掃・検査の手順書を変更することの重要性を指摘した。

なお、Barsebaeck-2号炉の事象発生以後に発行された各規制関連書簡の詳細内容は付録Ⅰ、規制指針RG-1.82改訂第2版の具体的内容は付録Ⅱを参照されたい。

4.3 規制指針の変更

前節に述べたように、規制指針RG-1.82は、当初、PWRにおける格納容器サンプの設計・製作・試験に関する要求項目を満たすための評価方法として策定された。しかし、その後の実験や解析による研究成果を基にRG-1.82が改訂（改訂第1版）されたが、その際、PWRの格納容器サンプのみならずBWRのサブプレッションプールに対しても、このRG-1.82改訂第1版を適用するようになった。ただし、改訂第1版では、デブリ除去装置の設置位置に関する項目を除くと、BWRのサブプレッションプールに対する評価方法は、基本的に、PWRの格納容器サンプと同様であるとしていた。

NRCは、近年の事例から、RG-1.82改訂第1版が、BWRプラントに対する評価ガイダンスとしては不十分であると判断し、更なる改訂を行うこととした。本節では、改訂第1版からの変更箇所を中心に、改訂第2版におけるBWRサブプレッションプールの適性を評価するためのガイドラインについて記述する。

改訂第1版、改訂第2版とも、以下に示す4つの章と付録から構成されている。

- A. Introduction
- B. Discussion
- C. Regulatory Position
- D. Implementation

表4.2(a)～(e)に、第1版と第2版の比較を示す。

表4.2(a)に示すように、最初の章（A. Introduction）では、RG-1.82と一般設計基準（General Design Criteria：GDC）との関係について簡単に述べており、第1版と第2版とで大きな相違点はないが、第2版では、最近NRCが発行したBulletin 93-02とSupplement 1, Bulletin 95-02及びBulletin 96-03が参考資料として明記されている。また、BWRプラントに関する部分に変更になった旨記載されている。

2番目の章（B. Discussion）では、まず、章の構成が変更されている。即ち、第1版が“PWR”と“BWR”の2つのセクションから構成されていたのに対し、第2版では、“概要”、“PWR”及び“BWR”の3つのセクションに分けられている（表4.2(b)参照）。記載内容についての変更は以下の通りである。

- (1) 変更内容の概略：第1版では、“PWR”のセクションにおいて、格納容器サンプの役割と安全上の問題、デブリの種類、格納容器サンプの設計と設置場所、ドレンサンプと格納

容器サンプとの関係、格納容器サンプスクリーンの設計と評価上の仮定、ECCSポンプの有効吸込水頭(NPSH)裕度、スクリーンの検査、について述べている。また、“BWR”のセクションにおいては、サプレッションプールの役割に関する記述はあるものの、それ以外については、PWRと同様であると記載されているだけである。これに対して、第2版では、格納容器サンプ及びサプレッションプールの安全上の問題とデブリの種類に関する記載が、“概要”のセクションに移された他、新たに、デブリの発生源に関する記述が追加されている。“PWR”のセクションについては、“概要”に移された部分を除くと、第1版からの変更はない。しかし、“BWR”のセクションは、サプレッションプールの役割以外は変更されている。具体的には、PWRと同様であるとの記載がなくなり、その代わりに、デブリ除去装置の設置とその種類、サプレッションプール内でのデブリ移送に関する解析についての記述が追加されている。

- (2) デブリの種類に関する記載内容の変更：デブリの種類として、第1版では、LOCAに起因して発生するデブリのみ対象としていたのに対し、第2版では、その他に、サプレッションプールにおける腐食生成物、異物及びスラッジを例に挙げLOCA以前から存在していたデブリを取り上げている。
- (3) デブリ発生源に関する記述の追加：第1版では記載されていないが、第2版では、デブリ発生源として、断熱材に限定せず、フィルター材、腐食生成物、異物及び塗料や被膜材を評価対象とするよう明記している。
- (4) BWRにおけるデブリ除去装置の設置とその種類に関する記述の追加：第1版では言及しておらず、第2版において新たに追加されている。ここでは、デブリ除去装置として、静的な吸込ストレーナ、動的な吸込ストレーナ及び動的なストレーナシステムの設置を規定し、各装置の概要について記述している。
- (5) BWRサプレッションプール内のデブリ移送解析に関する記述の追加：第1版では言及されておらず、第2版において追加された項目である。具体的には、サプレッションプール内でのデブリ移送解析において、破断口径や位置によるLOCA時の水力的現象（蒸気凝縮による振動やチャギングなど）及び継続時間の違い、デブリの種類や量によるストレーナ部での圧力損失特性の変化等を考慮することの必要性を明記している。

3番目の章(C. Regulatory Position)は、“PWR”のセクションと“BWR”のセクションから成り構成上の変更はなく、また、“PWR”のセクションにおける記載内容にも変更はない。しかし、“BWR”のセクションについては、大幅に変更されている。この章に対する第1版と第2版との比較を表4.2(c)に示す。以下に、同表に沿ってその内容を記す。

- (1) 変更内容の概略：第1版では、サプレッションプールに持たせるべき特徴として、次の12項目を取り上げている。
- ① デブリ除去装置の構成
 - ② デブリ除去装置の設置場所
 - ③ 原子炉建屋内上部区画からのドレン設計
 - ④ デブリ除去装置の設計強度

- ⑤デブリの移動及び除去装置での流速の計算における仮定
- ⑥設計流速の評価におけるデブリ除去装置の有効表面積
- ⑦サブプレッションプールの水力的性能とデブリによる影響の評価
- ⑧デブリ除去装置の耐震性
- ⑨デブリ除去装置開口部の大きさ
- ⑩ECCSポンプ吸込口の設計
- ⑪デブリ除去装置の材料
- ⑫供用期間中検査に関する要求事項

これに対し、第2版では、静的ストレーナの設計・設置、デブリの量の抑制対策、計装設備の配備、動的ストレーナの設計・設置、供用期間中検査、各設備・機能の評価と代替水源、デブリの生成及び発生源、デブリの移送、ストレーナの閉塞及び圧力損失、というサブセクションを設けて新たな記述を追加している。なお、第1版の上記12項目のうち、③～⑥、⑧、及び、⑩～⑫については、若干の表現の違いはあるものの内容的には同一の記述が、該当するサブセクションに示されている。また、⑨は、具体例を挙げる等記載内容が詳細化されているが、①、②及び⑦は削除されている。

(2) 第2版におけるサブセクションの概要：以下では、第2版において設けられた各サブセクションの概要を説明する。

・静的ストレーナの設計・設置

このサブセクションでは、静的ストレーナの設計及び設置において考慮すべき7つの項目を示しており、そのうちの6項目は、第1版の項目(③、④、⑧、⑨、⑩及び⑪)に対応している。1項目だけは新たに追加されたものであり、ストレーナの大きさや形状に対する設計上の考慮が記載されている(デブリ閉塞によるNPSH喪失の防止や緩和に有効な大きさ・形状を選択すべきである旨の記載)。

・デブリの量の抑制対策

このサブセクションでは、ストレーナ閉塞を引き起こし得るデブリの量を抑制するための対策について記載しており、具体的には、格納容器清掃プログラムの策定あるいはドライウェル-ウェットウェル間デブリ除去装置の設置のいずれかの対策を講じるよう求めている。

・計装設備の配備

このサブセクションでは、ストレーナでのデブリ蓄積やその影響緩和のための運転員対応を必要とする場合、ECCSポンプのNPSHに関する計装設備を制御室に配備するよう求めている。

・動的ストレーナの設計・設置

このサブセクションでは、ストレーナでのデブリ蓄積やその影響緩和のための動的機器あるいはシステムに関する設計・設置上の考慮を示している。

・供用期間中検査に関する要求事項

このサブセクションは、第1版の項目⑫に対応しており、サブプレッションプールの清

掃状況の確認検査、ストレーナの健全性の目視検査、及び、デブリ除去のための格納容器内検査の実施を求めている。

- ・各設備・機能の評価と代替水源

このサブセクションでは、ストレーナでのデブリ蓄積やその影響緩和のための設備・機能が、炉心の長期冷却を担保する上で適切であることを確認するための評価を行うよう求めている。また、代替水源の利用及びその手順書を整備することにより長期冷却機能に多様性を持たせる際に考慮すべき事項について記載している。

- ・デブリの生成及び発生源

このサブセクションは、破断位置や口径の異なる多様なLOCAに対してデブリの生成量を推定するための方法や仮定と、デブリの発生源として考慮すべき物質について記述している。具体的には、考慮すべき破断位置、破断の影響を受ける領域の決定方法、デブリの生成量や考慮すべきデブリの種類と大きさの推定等に対する方法と仮定について基本的な考え方が示されている。

- ・デブリの移送

このサブセクションは、サプレッションプール内でのデブリの移送を評価するための方法や仮定について記載しており、デブリの沈降や濃度、ストレーナ部での流速等に関する推定方法や仮定について基本的な考え方が示されている。この中には、第1版における項目⑤（デブリの移動及び除去装置での流速の計算における仮定）に対応する記述が含まれている。

- ・ストレーナの閉塞及び圧力損失

このサブセクションは、ストレーナの閉塞とそれによる圧力損失を評価するための方法と仮定について記載している。具体的には、ストレーナ表面へのデブリの蓄積速度、ストレーナの閉塞の程度、及び、それによる圧力損失の程度を推定するための方法や仮定に関する基本的な考え方が示されている。この中には、第1版における項目⑥（設計流速の評価におけるデブリ除去装置の有効表面積）に対応する記述が含まれている。

最後の章 (D. Implementation) は、RG-1.82を適用すべき対象について述べているが、表4.2(d)に示すように、第1版と第2版では、その適用対象が異なっている。即ち、第1版では、①1986年5月以後の建設許可申請及び設計承認申請、②将来の建設許可での参照を目的とし1986年5月までに承認を得ていない標準設計の最終設計承認申請、及び、③1986年5月以後の許認可申請、を対象としていたのに対し、第2版では、①将来の建設許可での参照を目的とし1996年4月までに承認を得ていない標準設計の最終設計承認申請、②長期再循環水源に影響を及ぼし得るプラント設計変更、及び、③Bulletin 96-03で要求された対策の実施、が対象となっている。

付録については、表4.2(e)に示すように、第1版が“Appendix A”のみであるのに対し、第2版では“Appendix A”の他“Appendix B”を添付している。“Appendix A”では、第1版、第2版とも、「非常用炉心冷却水源のレビューガイドライン」として、(1)PWRの格納容器

サンプ及びBWRのサブプレッションプールに関する水力的性能、(2)LOCA起因のデブリによる影響、(3)悪条件下でのポンプ性能、及び、(4)これら3つの相互影響の評価において考慮すべき事項が記述されており、表現上の違いはあるものの内容の変更はない。第2版で新たに追加された"Appendix B"では、ストレーナの閉塞を緩和するための動的システムとして、(1)配管内ストレーナ（バックフラッシュ運転による異物除去が可能）、(2)自洗式ストレーナ、及び、(3)バックフラッシュ・システムが例示されている。

表4.2 規制指針RG-1.82の改訂第2版における記述内容と改訂第1版からの変更点

(a) 第1章 (A. Introduction)		改訂第1版からの変更点等
	改訂第2版における記述概要	
章の構成	4つのパラグラフ	・ 第1版では3つのパラグラフから構成
第1パラグラフ	・ 一般設計基準との関係	・ 第1版の第1パラグラフにおける「本指針の概要」が第2パラグラフへ
第2パラグラフ	・ 本指針の概要 ・ NRC発行のBulletinの紹介	・ 第1版の第2パラグラフにおける「ACRSの貢献に関する記述」の削除 ・ 関連するBulletinの紹介を追加
第3パラグラフ	・ 第1版からの変更に関する経緯 ・ 第1版からの変更箇所	・ 第1版からの変更に関する記述を追加
第4パラグラフ	・ 本指針に関する情報収集に関する記述	・ 第1版における第3パラグラフの内容と同じ

表4.2 規制指針RG-1.82の改訂第2版における記述内容と改訂第1版からの変更点
(b) 第2章 (B. Discussion)

改訂第2版における記述概要		改訂第1版からの変更点等
章の構成	3つの節 (General, PWRs, BWRs)	<ul style="list-style-type: none"> ・ PWR, BWRに加えて、“概要(General)”の節が追加
“概要”	<ul style="list-style-type: none"> ・ 再循環冷却に関する安全上の問題 ・ デブリの分類 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 第1版では“PWRs”の節に該当する記述あり ・ 第1版では“PWRs”の節に該当する記述あり (但し、第2版では、LOCA起因のデブリ以外にLOCA以前から存在するものも考慮しデブリ分類に関する記述を変更)
“PWRs”		
ECCサンプの役割	ECCS及び格納容器スプレー系再循環水源としての役割を記述	<ul style="list-style-type: none"> ・ 変更なし
安全上の問題	<ul style="list-style-type: none"> (1) LOCA後の水力的影響 (空気侵入) (2) 断熱材の破損によるデブリ除去装置の閉塞 (3) 上記(1)と(2)の組合せによる影響 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 記載内容の変更はないものの、第2版では“概要”の節に移動
デブリの分類	<ul style="list-style-type: none"> (1) LOCAにより生成されプロローダウンにより移送されるもの (2) ウォッシュダウンにより生成、移送されるもの (3) LOCA発生以前から存在するもの <p>さらに、これらのデブりを以下の3種類に分類</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) 高密度で沈降性の高いもの (2) 比重が1.0程度で沈降速度の遅いもの (3) 低密度で浮遊性の高いもの 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 第1版では、以下の4種類に分類 (1) LOCAにより生成されプロローダウンにより移送されるもの (2) 高密度で沈降性の高いもの (3) 比重が1.0程度で沈降速度の遅いもの (4) 低密度で浮遊性の高いもの ・ 第1版では断熱材のみ対象としていたが、第2版では、その他に、フィルター材、腐食生成物、外部からの異物、塗料や被膜材等をデブリ発生源として考慮 ・ 第1版の“PWRs”の節における記述を、“概要”の節に移動
ECCサンプの設計	<p>サンプを設計する際に考慮すべき項目を記述</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 空気侵入や水力的影響に対する配慮 ・ サンプ出口配管の設置位置と口径に対する配慮 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 変更なし
ECCサンプの位置	<p>サンプの設置位置に関して考慮すべき事項を記述</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ サンプに繋がるドレンや流路に対する配慮 (冷却材の最大限利用とデブリの流入防止) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 変更なし

表4.2 規制指針RG-1.82の改訂第2版における記述内容と改訂第1版からの変更点
(b) 第2章 (B. Discussion) (つづき)

	改訂第2版における記述概要	改訂第1版からの変更点等
PWRs		
ドレンサンプの設置	<p>ドレンサンプの設置上の配慮について記述</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ECCサンプより低い位置に設置 ・ECCサンプ周辺床の下り勾配 (ECCサンプへ移送されるデブリ量を低減) 	<ul style="list-style-type: none"> ・変更なし
デブリ除去装置の強度設計	<p>デブリ除去装置の強度設計において考慮すべき項目を記述</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地震による振動、蒸気ジェット荷重、飛来物衝撃荷重、及び、デブリ蓄積による差圧荷重に耐え得る強度 ・高エネルギー配管からの隔離 (飛来物対策) ・サンプ出口の多重化と物理的分離 	<ul style="list-style-type: none"> ・変更なし
デブリ除去装置の設置方法	<p>デブリ除去装置の設置に関する記述</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水平方向に設置することが望ましくないことを明記 ・上部カバー板の取付、空気抜きベントの設置 ・垂直方向設置の有効性 	<ul style="list-style-type: none"> ・変更なし
デブリスクリーニング開口部大きさ	<p>デブリスクリーニングの開口部大きさを決定する際に考慮すべき項目を記述</p> <ul style="list-style-type: none"> ・格納容器スプレッドプレートノズル口径 ・燃料集合体内の冷却材チャレンネル面積 ・ポンプシールやベアリング等のポンプ設計特性、等 	<ul style="list-style-type: none"> ・変更なし
ポンプ性能低下	<p>ポンプの性能低下に関して、NPSHと空気侵入量の関係を記述</p> <ul style="list-style-type: none"> ・空気侵入量が2%以下の場合NPSHが担保されればポンプの性能低下はない ・空気侵入量が2%を超える場合再循環ラインの再設計が必要となる 	<ul style="list-style-type: none"> ・変更なし
ECCサンプの検査	<p>デブリ除去装置の動作性及び健全性の確認検査に関する記述</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ECCサンプに検査用開口部を設けることの必要性 ・燃料取替時の目視検査等の実施 ・燃料取替終了時におけるサンプ領域の清掃状況の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・変更なし

表4.2 規制指針RG-1.82の改訂第2版における記述内容と改訂第1版からの変更点
(b) 第2章 (B. Discussion) (つづき)

	改訂第2版における記述概要	改訂第1版からの変更点等
BWRs		
サブレーションプールの役割	ECCS再循環水源としての役割を記述	・変更なし
サブレーションプールの性能上の問題	(1)LOCA後の水力的影響(空気侵入) (2)デブリによるECCS吸込ストレーナの閉塞 (3)上記(1)と(2)の組合せによる影響	・表現上の若干の変更はあるものの、内容は同じ
デブリ除去装置(吸込ストレーナの)の利用	デブリ除去装置の利用に関する記述 ・静的ストレーナあるいは動的ストレーナ(システム)の利用 ・静的ストレーナの特徴 ・動的ストレーナの特徴	・第1版における「デブリ除去装置の利用に関する記述」は以下の通り - プール以外の設置も可能 - ドライウエルやベント管での設置
デブリスクリーニング開口部大きさ	・第2版には該当する記述なし	・第1版では、デブリスクリーニングの開口部大きさを決定する際に考慮すべき項目を記述 - 格納容器スプレーノズル口径 - 燃料集合体内の冷却材チャタネル面積 - ポンプシールやベアリング等のポンプ設計特性、等
デブリ移送解析	サブレーションプール内におけるデブリの移送に関する解析上の考慮 ・破断口径や破断位置の違いによるLOCAの多様性 ・LOCA以前から存在するデブリ ・ストレーナでのデブリ蓄積によるフィルター作用 ・デブリ層による圧力損失特性	・第1版には該当する記述はなし(新規追加)

表4.2 規制指針RG-1.82の改訂第2版における記述内容と改訂第1版からの変更点
(c) 第3章 (C. Regulatory Position) (for PWRs)

記述概要	改訂第2版における記述概要	改訂第1版からの変更点等
(1) サンプの多重性	サンプ設計のガイドラインとして以下の15項目を取り上げている。	・変更なし
(2) サンプの物理的分離	2つ以上のサンプの設置、ECCSやCSSの1系統に十分な容量	・変更なし
(3) サンプの設置位置とデブリ除去装置の設置方法	隔壁によるサンプの分離、高エネルギー配管からの分離 サンプを実用上低い位置に設置、デブリ除去装置として目の細かいスクリーンと目の粗いトラッシュボックスを垂直方向に設置 サンプ周辺床の下り勾配設計	
(4) サンプ周辺床の設計	デブリを含むドレン水がデブリ除去装置に直接当たらないよう設計	
(5) 原子炉建屋内上部区画ドレンの設計	飛来物による衝撃荷重、デブリによる蓄積荷重等に耐え得る強度	
(6) デブリ除去装置の構造強度	デブリ除去装置の有効表面積は閉塞を考慮して保守的に評価、	
(7) デブリ除去装置の有効表面積に関する評価上の仮定	繊維性デブリがスクリーン表面に一樣に分布するものと仮定	
(8) ポンプのNPSH裕度に関する評価	サンプの水力的性能やデブリによる影響を考慮してポンプのNPSH裕度を評価	
(9) デブリ除去装置の構成	デブリ除去装置の頂部カバー板及び空気ベントの設置	
(10) デブリ除去装置の耐震設計	デブリ除去装置を地震時の振動に耐えるよう設計	
(11) デブリスクリーンの開口部設計	デブリスクリーンの開口部は再循環系の制約に基づいて設計	
(12) サンプ出口の設計	サンプ出口は空気の侵入等によるポンプ性能の低下を防ぐよう設計	
(13) デブリ除去装置の材質	デブリ除去装置には応力腐食等の悪影響を受けにくい材質を採用	
(14) デブリ除去装置の検査用開口部の設置	渦発生抑制装置やサンプ出口の検査用開口部を設置	
(15) サンプ機器（デブリ除去装置や渦発生抑制装置等）の検査	デブリ除去装置、渦発生抑制装置及びサンプ出口の供用中検査として、燃料取替時検査と目視による健全性確認検査を実施	

表4.2 規制指針RG-1.82の改訂第2版における記述内容と改訂第1版からの変更点
(c) 第3章 (C. Regulatory Position) (つづき ; for BWRs)

記述概要	改訂第2版における記述概要	改訂第1版からの変更点等
	<p>以下の3つのサブセクションに分けて記述</p> <p>(1) ECCSポンプのNPSH喪失可能性を最小限に抑えるための設備に関する設計上の配慮：静的ストレーナの設計、デブリの量の抑制対策、計装設備の配備、動的ストレーナの設計、及び、供用中検査に関する要件が記載されている。</p> <p>(2) 設備・機能に対する評価と代替水源：上記(1)の設備・機能に関する性能評価と、長期再循環機能に多様性を持たせるための代替水源の利用可能性について述べている。</p> <p>(3) 長期再循環機能の評価：デブリの生成及び発生源、デブリの移送、ストレーナの閉塞及び圧力損失に関する評価方法や仮定について記載している。</p>	<p>・第1版では、サブレシヨンプールに備えるべき特徴として以下の12項目を列挙</p> <ol style="list-style-type: none"> ① デブリア除去装置の構成 ② デブリア除去装置の設置場所 ③ 原子炉建屋内上部区画からのドレン設計 ④ デブリア除去装置の構造強度 ⑤ デブリアの移動及び除去装置での流速の計算における仮定 ⑥ 設計流速の評価におけるデブリア除去装置の有効表面積 ⑦ サブレシヨンプールの水力的性能とデブリアによる影響の評価 ⑧ デブリア除去装置の耐震性 ⑨ デブリア除去装置開口部の大きさ ⑩ ECCSポンプ吸込口の設計 ⑪ デブリア除去装置の材料 ⑫ 供用中検査に関する要件

表4.2 規制指針RG-1.82の改訂第2版における記述内容と改訂第1版からの変更点
(c) 第3章 (C. Regulatory Position) (つづき ; for BWRs)

	改訂第2版における記述概要	改訂第1版からの変更点等
(1)ECCSポンプの静的ストレーナの設計・設置上の配慮	<p>改訂第2版に抑えるための設備に関する設計上の配慮</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ストレーナの大きさ・形状：デブリ閉塞によるNPSH喪失の防止、あるいは、NPSH喪失までの時間を最大限に遅らせるよう設計 ・ストレーナにおける開口部大きさ：サブレッションプールを水源とする系統の物理的制約（格納容器スプレーンズル隙間、燃料集合体内の冷却材チャンネル面積、ポンプシールやベアリング等のポンプ設計特性）を考慮 ・ポンプ吸込：空気侵入等の水力的影響によるポンプ性能低下を防ぐよう設計 ・原子炉建屋内上部区画ドレン：デブリを含む水が直接デブリ除去装置に当たらないよう設計 ・ストレーナの構造強度：飛来物による衝突荷重、デブリ蓄積による荷重、流力荷重に耐えるよう設計 ・ストレーナの耐震性：構造上の強度を維持し地震時の振動に耐えるよう設計 ・ストレーナの材質：休止期間及び運転期間における機能低下を考慮して選定 ・格納容器の清掃：サブレッションプールの定期的な清掃を行うためのプログラムの策定と、異物除去のための手順書の整備 ・デブリ除去装置の設置場所：ドラライウエル内ベント管近傍への設置 	<ul style="list-style-type: none"> ・第1版には該当する記載なし（新規追加） ・第1版における項目⑨に対応しているが、系統の物理的制約に関する例を新たに記載 ・第1版における項目⑩に対応（同一内容） ・第1版における項目⑬に対応（同一内容） ・第1版における項目⑭に対応（評価対象として、流力荷重が追加） ・第1版における項目⑧に対応（同一内容） ・第1版における項目⑪に対応（同一内容） ・第1版には該当する記載なし（新規追加）
デブリの量の抑制対策	<ul style="list-style-type: none"> ・ストレーナでのデブリ蓄積を防止したり、デブリ蓄積による影響を緩和するための計装設備（NPSH喪失の兆候の表示・警報）の制御室配備 	<ul style="list-style-type: none"> ・第1版における項目②に類似の記載があるが、表現及び内容は異なる ・第1版には該当する記載なし（新規追加）
計装設備の配備	<ul style="list-style-type: none"> ・ストレーナでのデブリ蓄積を防止したり、デブリ蓄積による影響を緩和するための動的機器（システム）の設置、ECCS機器・系統への影響を考慮して設計 	<ul style="list-style-type: none"> ・第1版には該当する記載なし（新規追加）
動的ストレーナの設置上の配慮	<ul style="list-style-type: none"> ・使用中検査計画の確立 ・燃料取替時検査：サブレッションプール清掃状態の確認 ・目視検査：ストレーナの構造上の健全性確認 ・格納容器内検査：デブリや作業残余物の除去 	<ul style="list-style-type: none"> ・第1版には該当する記載なし（新規追加） ・第1版における項目⑫に対応（表現上若干の違いはあるが内容的にはほぼ同等）
供用中検査	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料取替時検査：サブレッションプール清掃状態の確認 ・目視検査：ストレーナの構造上の健全性確認 ・格納容器内検査：デブリや作業残余物の除去 	<ul style="list-style-type: none"> ・第1版には該当する記載なし（新規追加） ・第1版における項目⑫に対応（表現上若干の違いはあるが内容的にはほぼ同等）

表4.2 規制指針RG-1.82の改訂第2版における記述内容と改訂第1版からの変更点

(c) 第3章 (C. Regulatory Position) (つづき; for BWRs)

改訂第2版における記述概要		改訂第1版からの変更点等
(2) 設備・機能に 対する評価と代替 水源	<p>改訂第2版における記述概要</p> <ul style="list-style-type: none"> 上記(1)の設備・機能に関する性能評価：長期冷却を確保するのに適切であることと10CFR50.46(b)の基準を満足することを実証、デブリの蓄積防止あるいは影響緩和のための運転員対応をに適切な表示及び性能の確認 代替水源：代替水源利用のための手順書を整備することによる長期冷却機能の多様化、利用に必要な機器を保守プログラムに含むよう配慮 	<ul style="list-style-type: none"> 第1版には該当する記載なし (新規追加)
(3) 長期再循環機能の デブリの生成及び 発生源	<p>評価方法や仮定</p> <ul style="list-style-type: none"> デブリ生成量：10CFR50.46に従い、破断位置や口径等の異なる多様なLOCAに対して評価 破断の影響を受ける領域の決定：NUREG/CR-6224の方法を使用（影響を受ける体積、破断口からの距離、破断時の衝撃波等を用いて、各領域内でのデブリの生成量、デブリの粒径分布を推定） デブリ発生源：格納容器内の繊維性物質（防火材、断熱材、フィルター材）、塗装、布製あるいはプラスチック製物質、粒子性物質の同定 破断位置：主蒸気配管、給水配管、再循環配管、ドライウエルとウエルトウエルとの間に直接経路を形成する領域での破断、等 ストレーナ閉塞を引き起こすデブリの量と種類の推定：格納容器内の清掃状態を考慮、腐食生成物や異物によるストレーナの圧力損失への影響を考慮 LOCA以前から存在するデブリの量：腐食生成物の最大量を想定、粒径分布等はプラントのサンプルに基づいて推定 	<ul style="list-style-type: none"> 第1版には該当する記載なし (新規追加)
デブリの移送	<ul style="list-style-type: none"> サブレシジョンプールへのデブリ移送：デブリの全量移送を仮定（ドライウエル内デブリ除去装置の効果は実験や解析により評価） プール内デブリの状態：LOCA時に存在していたデブリは全て浮遊と仮定、LOCAによる擾乱は収まった後のデブリ沈降速度を解析や実験により立証 プール内デブリの濃度：ドライウエルから移動するデブリ及び予め存在するデブリや異物の量を基に計算 ストレーナでの流速計算：再循環モード運転、局所的な乱流やプールの混合によるプール水全体の流速を考慮 	<ul style="list-style-type: none"> ストレーナでの流速計算に関する部分（第1版における項目⑤に対応）以外、第1版には該当する記載なし (新規追加)

表4.2 規制指針RG-1.82の改訂第2版における記述内容と改訂第1版からの変更点
(c) 第3章 (C. Regulatory Position) (つづき; for BWRs)

	改訂第2版における記述概要	改訂第1版からの変更点等
(3)長期再循環機能の閉塞ストレーナの閉塞及び圧力損失	<p>改訂第2版における記述概要</p> <p>・ストレーナ表面へのデブリの蓄積速度の評価 - 上記の「デブリの生成及び発生源」に示す方法や仮定を用いて推定したデブリの量と「デブリの移送」に示す方法や仮定を用いて推定したプールへのデブリ移送量に基づく - ストレーナでの流速及びプール内でのデブリ濃度を用いる ・デブリの接近速度：ストレーナの有効表面積を用いて評価（実験あるいは解析による裏付けがない限り、デブリはストレーナ表面に一樣に分布すると仮定する） ・デブリ閉塞による圧力損失：ストレーナの設計（表面積や幾何形状等）に基づく経験データ、デブリの種類や量及び粒径分布、接近速度から推定 ・ストレーナの性能特性：デブリの種類や量に対する静的あるいは動的ストレーナの性能特性は実験データによる裏付けが必要</p>	<p>「デブリの接近速度」に関する部分（第1版における項目⑥に対応、表現上の違いはあるが内容はほぼ同等）を除き、第1版には該当する記載なし</p>

表4.2 規制指針RG-1.82の改訂第2版における記述内容と改訂第1版からの変更点
(d) 第4章 (D. Implementation)

	改訂第2版における記述概要	改訂第1版からの変更点等
本指針の適用対象	<p>改訂第2版における記述概要</p> <p>(1) 将来の建設許可や許認可申請を目的とし1996年4月までに承認を得ていない標準設計の最終承認申請 (2) 長期再循環用水源のアーバイラビリティに影響を及ぼし得る設計変更 (3) Bulletin 96-03で要求された対策の実施</p>	<p>第1版における適用対象も3種類 ・左記の(1)は同様（但し、1986年5月までに未承認のもの） ・他の2種類は以下の通り - 1986年5月以後の建設許可申請及び設計承認設計 - 1986年5月以後の許認可申請</p>

表4.2 規制指針RG-1.82の改訂第2版における記述内容と改訂第1版からの変更点

(e) 付録 (Appendix)

	改訂第2版における記述概要	改訂第1版からの変更点等
付録A：非常用炉心冷却水源のレビュウーガイドライン	(1) PWR格納容器サンプ及びBWRサブレシジョンプールに関する水力的性能 (2) LOCA起因のデブリによる影響 (3) 悪条件下でのポンプ性能 (4) 上記3項目の相互影響評価において考慮すべき事項	<ul style="list-style-type: none"> ・ 第1版においても左記の4項目を記載 ・ 最新情報を参照している点を除くと内容の変更なし
付録B：動的緩和システムの例	ストレーナ閉塞の緩和シテムとして以下の3種類を例示 (1) 配管内ストレーナ (バックフラッシュ動作による異物除去) (2) 自洗式ストレーナ (外部からの支援なしで洗浄) (3) バックフラッシュ機能付きストレーナ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 第1版には該当する記載なし (新規追加)

5. おわりに

本報告書では、沸騰水型原子力発電所(BWR)のサプレッションプール非常用炉心冷却系(ECCS)吸込ストレーナの閉塞事象に関し、1992年にBarsebaeck-2号炉で発生した事例と、それ以降に米国のプラントで発生した類似の事例の内容を紹介すると共に、米国原子力規制委員会(U.S. Nuclear Regulatory Commission : NRC)が発行した規制関連書簡(Information Notice及びBulletin)と関連する規制指針(Regulatory Guide 1.82 : RG-1.82)を基に、この問題に対するNRCの対応の経緯をまとめた。1992～1996年の約5年間に、10件の類似事例が起り、さらに、11件の規制関連書簡が発行されていることから、NRCがこの問題を重要視してきたことがうかがえる。

ECCS吸込ストレーナの閉塞問題は、LOCA後の長期炉心冷却機能の喪失に繋がるため安全上の重要性が高いと認識され、特に、米国では、1970年代後半から1980年代前半にかけて、様々な研究がなされ、その成果を反映して1985年には規制指針RG-1.82の改訂も行われた(改訂第1版)。この時点でストレーナ閉塞問題は解決されたものと考えられた。しかし、当時は、閉塞の原因として、配管断熱材デブリのようにLOCA時に発生するものだけが対象とされてきたが、最近の事例では、腐食生成物のようにプラントの通常運転中に生成されるデブリや、格納容器内に仮設されたりあるいは持ち込まれたまま放置された物質によって閉塞に至る可能性が示されている。また、Barsebaeck-2号炉の事象や、その後米国並びに欧州諸国において行われた実験により、デブリの発生や移送に関して従来の方法が過小評価するという問題が明らかとなった。こうした状況を反映して、NRCは規制関連書簡を通して、格納容器内の清掃管理の強化や、ストレーナの設計変更(大容量ストレーナや洗浄機能付きストレーナの設置)等を行うよう設置者に要求すると共に、1996年5月に規制指針RG-1.82を再度改訂し(改訂第2版)、BWRにおけるサプレッションプール吸込ストレーナの閉塞を評価するためのガイダンスを変更した。ストレーナの設計変更は、1997年1月以後の燃料取替時に実施するよう各BWRプラントに求められており、その際には、規制指針RG-1.82改訂第2版に示す評価ガイダンスに従うことが義務づけられている。

一方、欧州諸国においても、Barsebaeck-2号炉の事象以後、その安全上の重要性に鑑み、ストレーナの設計改良が進められてきた[29,30]。また、断熱材の材質に関する実験的研究も行われており、その成果に基づき、断熱材を従来の繊維性物質から金属製物質(reflective metallic insulation)へ変更したプラントもある[29,30]。

上述のように、米国並びに欧州諸国においては、ストレーナ閉塞に関して設計変更などのバックフィットが行われつつある。従って、今後も、各国の状況をフォローし、実際に如何なる対策が講じられたかを把握する必要があると考えられる。

参考文献

- (1) USNRC : Partial Plugging of Suppression Pool Strainers at a Foreign BWR, Information Notice 92-71, September 30, 1992.
- (2) McGraw-Hill : Nucleonics Week, September 24, 1992.
- (3) McGraw-Hill : Nucleonics Week, October 1, 1992.
- (4) McGraw-Hill : Nucleonics Week, January 7, 1993.
- (5) LER 440/93-011, May 19, 1993.
- (6) LER 387/93-007, July 2, 1993.
- (7) USNRC : Debris in Containment and the Residual Heat Removal System, Information Notice 94-57, August 12, 1994.
- (8) USNRC : Potential Blockage of Safety-Related Strainers by Material Brought inside Containment, Information Notice 95-06, January 25, 1995.
- (9) USNRC : Unexpected Opening of a Safety/Relief Valve and Complications Involving Suppression Pool Cooling Strainer Blockage, Information Notice 95-47, October 4, 1995.
- (10) McGraw-Hill : Inside N. R. C., September 18, 1995.
- (11) USNRC : Potential Degradation of Post Loss-Of-Coolant Recirculation Capability as a Result of Debris, Information Notice 96-59, October 30, 1996.
- (12) USNRC : Water Sources for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss-of-Coolant Accident, Regulatory Guide 1.82 (Revision 0), June 1974.
- (13) A. W. Serkiz : Containment Emergency Sump Performance - Technical Findings Related to Unresolved Safety Issue A-43, NUREG-897 (Revision 1), October 1985.
- (14) A. W. Serkiz : USI A-43 Regulatory Analysis, NUREG-869 (Revision 1), October 1985.
- (15) USNRC : Water Sources for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss-of-Coolant Accident, Regulatory Guide 1.82 (Revision 1), November 1985.
- (16) USNRC : Potential for Loss of Post-LOCA Recirculation Capability Due to Insulation Debris Blockage, Generic Letter 85-22, December 3, 1985.
- (17) USNRC : Potential for Loss of Post-LOCA Recirculation Capability Due to Insulation Debris Blockage, Information Notice 88-28, May 19, 1988.
- (18) USNRC : New Information Regarding Insulation Material Performance and Debris Blockage of PWR Containment Sumps, Information Notice 90-07, January 30, 1988.
- (19) USNRC : Potential for Loss of Emergency Cooling Function Due to a Combination of Operational and Post-LOCA Debris in Containment, Information

Notice 93-34, April 26, 1993.

- (20) USNRC : Potential for Loss of Emergency Cooling Function Due to a Combination of Operational and Post-LOCA Debris in Containment, Information Notice 93-34 (Supplement 1), May 6, 1993.
- (21) USNRC : Debris Plugging of Emergency Core Cooling Suction Strainers, Bulletin 93-02, May 11, 1993.
- (22) D.N.Brocard : Buoyancy, Transport, and Head Loss of Fibrous Reactor Insulation, NUREG/CR-2982, July 1983.
- (23) USNRC : Debris Plugging of Emergency Core Cooling Suction Strainers, Bulletin 93-02 (Supplement 1), February 18, 1994.
- (24) G.Zigler, et al. : Parametric Study of the Potential for BWR ECCS Strainer Blockage Due to LOCA-Generated Debris, NUREG/CR-6224, September 1995.
- (25) USNRC : Potential Plugging of Emergency Core Cooling Suction Strainers by Debris in Boiling Water Reactors, Bulletin 95-xx (Draft for Comment), April 26, 1995.
- (26) USNRC : Unexpected Clogging of a Residual Heat Removal (RHR) Pump Strainer While Operating in Suppression Pool Cooling Mode, Bulletin 95-02, October 17, 1995.
- (27) USNRC : Potential Plugging of Emergency Core Cooling Suction Strainers by Debris in Boiling Water Reactors, Bulletin 96-03, May 6, 1996.
- (28) USNRC : Water Sources for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss-of-Coolant Accident, Regulatory Guide 1.82 (Revision 2), May 1996.
- (29) Nuclear Engineering International, Vol. 40, No. 493, pp. 34-36, August 1995.
- (30) Nuclear Engineering International, Vol. 40, No. 496, pp. 18-20, November 1995.

付録 I 米国原子力規制委員会発行の規制関連書簡の内容

表 I.1に示すように、Barsebaeck-2号炉の事象以後、米国原子力規制委員会(NRC)は11件の規制関連書簡(Information Notice: 7件、Bulletin: 4件)を発行し、米国内のBWR設置者にECCS吸込ストレーナの閉塞について注意を促すと共に、発生防止や緩和のための対策を講じるよう要求してきた。付録Iでは、各々の書簡における記載内容を示す。

1. Information Notice 92-71

[発行年月日] 1992年9月30日

[タイトル]

米国外のBWRにおけるサブプレッションプールストレーナの部分閉塞

[状況説明]

1992年7月28日、Barsebaeck-2号炉は再起動中であり、原子炉出力は1.2%、圧力は435psiであった。この時、パイロット弁の漏洩により安全弁が開いた。原子炉はスクラムし、高圧注入系、炉心スプレー系、格納容器スプレー系が自動起動した。安全弁は、ドライウェルに直接蒸気を放出する設計となっていたため、安全弁から放出された蒸気が機器を覆っている断熱材にあたったことにより、金属被覆の鉍物綿440ポンドが脱落した。推定で約220ポンドの断熱材がサブプレッションプールに流れ込み、その結果、ECCSポンプ吸込側ストレーナ5基のうち2基が鉍物綿により部分的に閉塞した。閉塞により、ストレーナ出口の圧力が著しく低下し、ポンプ1基でキャビテーションの兆候が認められた。そのため、運転員は、ストレーナのバックフラッシュを行った。

[議論]

Barsebaeck-2号炉の安全解析において、設置者は、LOCA後10時間以内はストレーナのバックフラッシュを必要としないと結論づけていた。7月28日の事象により、スウェーデンの規制委員会は、Barsebaeck-2号炉と類似の設計を有する他の4基のプラントに対して、この問題が解決するまで原子炉を停止するよう要求した。

Barsebaeck-2号炉で発生した事象は、NRCが以前に行った検討に直接当てはまるものであり、その検討では、脱落した断熱材がデブリを形成しサンプルスクリーンに引き込まれる可能性を評価していた。その結果は、NUREG-0897に報告されており、NRCは、「サンプル閉塞に関連するリスクは、米国内のプラントのバックフィッティングを是認するものではない」と結論づけていた。しかし、Barsebaeck-2号炉の事例に基づき、この結論を再度検討することとなった。

2. Information Notice 93-34及びSupplement 1

[発行年月日] 1993年4月26日

[タイトル]

格納容器内における運転時及びLOCA後デブリによるECCS機能喪失の可能性

[状況説明]

ECCSやRHRのポンプ吸込側ストレーナが実際に閉塞した、あるいは、その可能性のあった事例を以下に示す。

Perry炉 (MARK-III型格納容器BWR)

1992年5月22日、第3回燃料取替停止中、水中ビデオカメラを用いて、サプレッションプール床とプール内の吸込ストレーナの点検を行った結果、プール床上とRHR吸込ストレーナ“A”と“B”にデブリが見つかった。このデブリは、通常の保守作業に用いられる物質と、プール床上に溜まっていた微細な埃塵から成るものであった。対策として、1993年1月の中間停止中に、設置者は、サプレッションプールの水抜きを行いストレーナを洗浄した。洗浄の結果、RHRストレーナ“A”と“B”は変形していることが判明した。ストレーナは、円錐形をしており、18ゲージのステンレス鋼板からなっている。このステンレス鋼板には、直径0.18cmの穴があいており、その中心には十字型の固定板が取り付けられている。固定板間のステンレス鋼板が曲っており、また、ストレーナ1基では小さな亀裂が3カ所見つかった。設置者は、1993年2月、中間停止からの再起動前に、変形したストレーナを交換した。設置者が、RHRポンプ“A”と“B”の吸込圧力及びストレーナ両側の差圧をレビューしたところ、ポンプ吸込圧力には特に際立った傾向は認められなかった。1993年3月、原子炉は計画外停止し、逃し安全弁(SRV)を手動で開き原子炉圧力を制御すると共に、RHRによるサプレッションプールの冷却が行われた。その後、ストレーナの点検を行った結果、RHRストレーナ“B”にデブリの付着が認められた。ポンプの動作性を確認するため、ストレーナを見つかったままの状態にして、RHRポンプ“B”の試験を行った。試験は、システムエンジニアの指示に従って、10時間続けられたが、試験開始時に44.1kPaであったポンプ吸込圧力が、試験終了時には0kPaに低下した。吸込圧力の計装系を改良して2度目の試験を行ったところ、前回同様、18時間後にはポンプ吸込圧力は0kPaに低下した。さらに8時間、同ポンプを作動させたが、吸込圧力の低下は認められなかった。また、これら2回の試験では、ポンプ流量とモータ電流には特に大きな変化は認められなかった。

Grand Gulf炉 (MARK-III型格納容器BWR)

1988年3月18日と1989年7月2日、RHRポンプ“A”の吸込圧力が供用中検査の容認基準である17.2kPaより低くなった。設置者は、吸込圧力の低下の原因をサプレッションプールからの吸込側に取り付けられたストレーナの閉塞と判断した。そのため、設置者は、サプレッションプールの清掃をより徹底的に行うと共に、ポンプ起動時にストレーナが清浄であることを担保するために吸込圧力の限界値をより厳しく設定した。最初の清掃の後、設置者は、各燃料取替停止終了時にサプレッションプールのバキューム清掃を行うことを決定した。1989年7月以降、吸込圧力制限値17.2kPaを下回るような事象は起こっていない。

North Anna (PWR)

蒸気発生器(SG)交換プログラムの一環として、SGから反射金属製断熱材を取り外したと

ころ、SGの塗装に使用されていたシリコン-アルミニウム塗料が劣化しSG外表面から剥がれ落ちそうになっており、辛うじて断熱材ジャケットに支えられている状態にあることが判明した。塗料片の大きさは、幅0.61mの紙状のものから粒子状のものまで様々であった。同じ種類の塗料が加圧器にも使用されていたが、これも同様に剥がれ落ちそうな状態にあった。この塗装は、格納容器内においてかなり多く使用されている。通常運転時には、塗料片は断熱材によって支えられているが、SGや加圧器の付近で配管/機器が破損した場合には、断熱材のジャケットが動いてしまい、塗料片は格納容器サンプに流入してECCSポンプのNPSH（有効吸込水頭圧）を低下させる可能性がある。

[議論]

あらゆる設計基準事故に対して、原子炉を安全な温度状態に維持するために非常用冷却材を供給することが重要である。この機能は、ECCSによってなされる。長期冷却において、これらの系統の吸込は、PWRでは格納容器サンプ、BWRではサブプレッションプールとなる。さらに、BWRのRHR系には、通常運転時及びトランジェント時にサブプレッションプール冷却を行う機能が設けられている。従って、長期冷却フェーズにおいては、ポンプの適切なNPSHを確保することが肝要であるが、NPSHへの脅威の一つは、吸込側ストレーナの閉塞である。BWRサブプレッションプール内のストレーナ表面あるいはPWR格納容器サンプのデブリスクリーンに過度の異物が付着すると、ポンプの動作性を悪化させる可能性がある。これらの付着物は、ECCSポンプの吸込側水圧をNPSH以下に低下させることになる。キャビテーションが起こると、ポンプは燃料被覆や格納容器圧力バウンダリの健全性を維持するのに十分な流量を供給することができなくなる。

IN 92-71に取り上げたBarsebaeck-2号炉の事例と同様、最近発生した上記の事象は、通常運転時だけではなくLOCA事象時にもデブリが生成される可能性のあることを示唆している。従って、安全関連系統の性能へのデブリの影響を評価する際には、両方の発生源（通常運転時及びLOCA時）を組み合わせて考慮する必要がある。

(Supplement 1)

[発行年月日] 1993年5月6日

[タイトル]

格納容器内における運転時及びLOCA後デブリによるECCS機能喪失の可能性

[状況説明]

IN 93-34では、Perry炉でのECCSポンプ吸込側ストレーナの閉塞事象を示した。特に、1993年3月の事象は、ストレーナを交換しサブプレッションプールの清掃を行ってから2ヵ月後に起こっている。IN発行後、設置者は、ストレーナに付着したデブリを化学的に分析した。その結果、デブリは、サブプレッションプールに誤って流れ込んだエアフィルター材の繊維と、この繊維によりプール水から除去された腐食生成物であった。また、少量ではあるが、繊維性のフィルター材がサブプレッションプール壁面付近から見つかった。

ドライウェル内には3基のエアフィルターがあるが、これらは繊維性材質を使用している。さらに、格納容器内には同様のエアフィルターが6基設置されている。エアフィルターの目的は、原子炉停止時に格納容器内及びドライウェル内の雰囲気を清浄することである。各停止期間終了時にフィルターを交換し、出力運転中はそのまま放置するのが、設置者側の通常のやり方であった。1993年3月の事象の結果、設置者は、ドライウェル内からこの種の繊維性物質を取除くために、起動前にフィルター材を取り外すこととしている。

[議論]

NUREG-0897改訂版は、USI A-43の解決策と相まって書かれており、LOCA時における繊維性断熱材の格納容器からストレーナへの移送について述べている。USI A-43の解決策は、部分的ではあるが、流量を妨げるような繊維性断熱材に関するストレーナの圧力損失試験に基づいている。USI A-43では、ストレーナ表面での繊維性物質のフィルター作用による圧力損失の影響を考慮していない。Perry炉の事例では、腐食生成物、埃塵、及び、LOCA時にドライウェルから流れ込むデブリをフィルター除去することで、所定の機能を要求された時にECCSポンプのNPSHが不十分になる可能性があることを示した。

3. Information Notice 94-57

[発行年月日] 1994年8月12日

[タイトル]

格納容器内及び残留熱除去系内のデブリ

[状況説明]

BWRのサブプレッションプールでデブリが見つかった事例を以下に示す。

LaSalle-1号炉(MARK-II型格納容器BWR)

1994年4月26日と5月11日、燃料取替時に、ECCS吸込ストレーナにおける1%未満の閉塞の原因となった少量のデブリを取り除くために、MARK-II型格納容器のサブプレッションプールの潜水清掃を行った。ダイバーは、同ストレーナの損傷や変形のないことを確認した。しかし、プール内に、多種多様のデブリが見つかったため、それらを除去した。最初の潜水清掃では、ヘルメット、汚染防止用の着衣、15.2m長のタイゴン管、ナット3個と4.6m長のダクト用テープが見つかり、また、2度目の潜水清掃では、8~46m長の1.9cm口径ホース4本、6~15m長のタイゴン管3本、5cm×10cmの木片及び懐中電灯が発見された。さらに、サブプレッションプールの床上には、0.3~5cm厚の沈澱が認められた。プール床は、基本的には水平であるが、その表面の所々に格子状の隆起がある。その隆起部には、5cm厚の沈澱が見つかった。設置者は、沈澱物の一部をサンプルとして分析を行った結果、濾過性の固体の成分は99%以上が酸化鉄であり、微量のニッケル、銅とクロムも含まれていることが判明した。濾過液には、120ppb (parts per billion) のニッケル溶液が含まれていた。有機成分は検出されなかった。放射性物質の観点からは、Co-60が75%で、Mn-54、Co-58とFe-59が極僅かながら含まれていた。設置者は、この沈澱物が、油成分や溶剤等を含まない

通常の腐食生成物であると結論づけた。プラント起動前に、全てのECCSストレーナからデブリを除去し、また、プール内で見つかった異物を全て取り除いた。

River Bend炉(MARK-III型格納容器BWR)

1994年6月13日、燃料取替中、ECCSストレーナとMARK-III格納容器型サブプレッションプールの点検を行った結果、プール内に16個の異物が見つかった。そのうちの1個はビニール袋であり、RHR吸込ストレーナ“A”で発見された。他の異物は、ハンマー、砥石車、レンチ、ソケット、ホース留め金、ボルト、ナット、パッド、インクペン、アンテナ、足場材(ナックル)、ロープ切れ端、使用済みテープ等であった。これらの多くは、サブプレッションプール内における作業時の遺失物リストに記録されていないものであった。設置者は、対応措置として、(1)サブプレッションプールからの異物除去、(2)他の箇所のデブリ点検、(3)ECCSポンプストレーナの清掃確認、及び、(4)新たな異物の落下を防止するためのサブプレッションプール作業エリアのサーベランス強化、を行った。設置者は、格納容器内の格子エリア付近における遺失物に関し、自らの方針と実施方法をレビューしている。さらに、サブプレッションプール内では沈澱物も認められた。前回の燃料取替時(1992年9月に終了)に、サブプレッションプールの排水と清掃が行われたが、不十分であったため、排水後、堰の内側に約0.3m高さの泥状の("mucky")水が残っていた。今回の燃料取替の際には、プール水の清掃にポータブルの浄化設備を用いており、プール水の静澄度は著しく改善された。しかし、沈澱層は未だプール床上に残っている。現在、常設のプール水浄化系の設置が計画されている。しかし、このシステムでも堰内側の沈澱物を除去することは困難であると考えられている。

Quad Cities-1号炉(MARK-I型格納容器BWR)

1994年7月14日、RHRループ“A”の保守後試験中、試験データにより、RHRのサブプレッションプール冷却モード注入弁(テスト用戻り配管上の弁)の閉塞が判明した。検査のため同弁を分解したところ、ビニール袋の切れ端がキャビテーション防止トリムに引っかかっているのが見つかった。大部分はトリムの吸込側に引っかかっていたが、一部はトリムを完全に通り抜けていた。少量のビニール袋がMARK-I型格納容器のサブプレッションプールで見つかったため取り除かれた。その後、RHRポンプ“C”の流量低下が認められたため調査を行った。7月23日、ボロスコープを用いてポンプ内部を検査した結果、10cm口径のワイヤブラシと金属片が羽根車の廻りで見つかった。設置者は、RHRの弁7Dの作業を行うため共用の吸込配管上のバタフライ弁(RHR弁6B)を外し、同ポンプから、ワイヤブラシ、金属片とワッシャー2個を取り出した。

[議論]

上記事例では、デブリによるECCS性能への悪影響の可能性を示している。デブリは格納容器内の異物管理が不適切であったこと、あるいは、安全設備(RHR)に関する保守作業後の検査が不適切であったことから生じたものである。

以前に発行されたNRCの書簡では、ECCSストレーナの閉塞が設計基準事故時のECCSポンプ

の機能に潜在的な脅威となることを示してきた。また、これらの書簡では、プラント内での作業中に発生するデブリやLOCA時に発生するデブリによりECCSストレーナが閉塞する可能性を取り上げている。ここで議論するデブリの種類は、サブプレッションプールやRHR内で見つかった類のものである。LaSalle-1号炉やRiver Bend炉の事例において発見されたデブリはストレーナの閉塞には十分なものではなかったが、LOCA時に発生するデブリと一緒にになると、ECCSポンプのNPSHの喪失を助長したり、ストレーナの損傷を引き起こす可能性がある。例えば、もし、汚染防止用着衣などのデブリがストレーナ表面に引き寄せられ、そこでフィルター作用により水中から微粒子が付着すると、プール内の腐食性沈澱物によりストレーナの閉塞に至ることが考えられる。さらに、重量の重い物体がLOCA時のブローダウン初期においてストレーナに当たると、ストレーナの損傷が起こる。

NRCの書簡は、補助給水系や安全注入系などの安全系でデブリが見つかり、流量試験において流量の低下が認められた事例についても言及してきた。Quad Cities-1号炉の事例は、RHR系内で発見されたデブリによるものであったが、このケースではデブリがトランジェントを引き起こしたり、トランジェントや事故の緩和に失敗したり、あるいは、設備の損傷に至る可能性があった。

4. Information Notice 95-06

[発行年月日] 1995年1月25日

[タイトル]

格納容器で移動した物質による安全系ストレーナ閉塞の可能性

[状況説明]

1994年4月28日、Palisades炉において、冷態停止中、格納容器内で使用されているプラスチック製物質により設計基準事故後に格納容器サンプのスクリーンが閉塞する可能性のあることが判明した。高圧安全注入系ポンプと格納容器スプレー系ポンプは作動不能と宣言され、不必要な物質を除去するための清掃作業が開始された。

1994年4月、Grand Gulf炉において、格納容器内で使用されているビニール製のラップ及び類似の物質による安全系ストレーナの閉塞の可能性が評価された。この評価では、作業員の放射線防護区域と乾燥器／気水分離器の支持縦桁を覆う薄いビニール製フィルムが対象とされた。ビニール製のフィルムは汚染の拡大防止用に用いられてきたものであり、LOCA時に格納容器スプレー系の作動により外れサブプレッションプールに移送される可能性がある。

1994年10月10日、Browns Ferry-2号炉において、サブプレッションプール内の検査を行ったところ、プール床と非常用炉心冷却系(ECCS)ストレーナ表面から布切れが多数見つかった。そのほとんどは、 25cm^2 程度のものであった。ビデオカメラによりプール内の状態を調べたところ、あるストレーナではその表面の約15%がふさがっていることが判明した。発見された物質は、保守や清掃時に用いられる吸湿性のペーパータオルの切れ端であった。

[議論]

上記の事例は、格納容器内部で移動するビニール製あるいは繊維製の物質が設計基準事故後にストレーナの閉塞を引き起こす可能性のあることを示している。これらの物質は、汚染の拡大防止や清掃等のために格納容器内部での使用を認められて意図的に持ち込まれたものである。以下では、上記事例で発見された物質とその後の対策について記述する。

Palisades炉 (PWR)

設置者は、格納容器内部の配管、機器や壁に張り付ける粘着性の表示ラベルの使用について評価を行った。その結果、設計基準事故により生じ得る高温多湿の状態での使用は粘着性を損ない剥がれる可能性の高いことが判明した。従って、この種の物質が格納容器サンプルに入り込みECCS再循環を妨げる可能性があるとして結論づけられた。格納容器内を徹底的に清掃し、不必要な表示ラベルやダクトテープを取り除いた。清掃後も、総面積で約 $0.9m^2$ の物質が取り残されていた。そのため、範囲を広げて再度清掃が行われた。設置者は、粘着性の表示ラベルによるサンプル閉塞を防ぐために格納容器清掃に関するチェックリストの作成を計画している。また、サンプル閉塞の可能性を考慮して表示ラベルの基準策定も行うこととしている。

Grand Gulf炉 (MARK-III型格納容器BWR)

設置者は、ECCSストレーナ閉塞を引き起こし得る格納容器内物質の検査を行った。検査では、燃料取替用機器の覆いに用いられるビニール製フィルムに重点が置かれた。乾燥器／気水分離器の支持縦桁からビニール製フィルムを取り外しLOCA時に耐え得るものと交換することとなった。設置位置の関係で、作業員の放射線防護区域を覆うビニール製フィルムはサブプレッションプールには流入しないものと判断され、そのまま使用されることとなった。また、階段の滑り止めについてもストレーナ閉塞の可能性が評価された。この滑り止めは、汚染防止の観点から、放射線管理区域出口に取り付けられており、床にテープで固定されている。設置者は、この滑り止めは格納容器スプレー系の作動により剥がれることはないとは判断したが、その可能性を極力抑えるために、その後の作業で必要でないものは取り外すこととした。

Browns Ferry-2号炉 (MARK-I型格納容器BWR)

サブプレッションプールの検査により多数のペーパータオルとテープが見つかったため、設置者は、プールとストレーナの清掃を行い、それらの物質を取り除いた。合計で約 $1m^2$ の物質が除去された。ストレーナ4基の総面積は $3.7m^2$ であるが、仮に、取り出された物質が全てストレーナ表面に付着すればストレーナ表面の約25%が閉塞することになる。ビデオテープにより、ストレーナ1基から約15%の部分閉塞が認められた。設置者の計算によれば、ストレーナが約65%まで閉塞しても所定の流量が保証される。設置者は、サブプレッションプールへの物質の流入経路として、(1)作業員通用口、(2)真空破壊装置ベント、及び、(3)サブプレッションプールのダウンコマベント、を同定した。設置者による対策は、以下の通りである。

- ・ (2)及び(3)については、近辺での作業はカバーを取り付けてから行うこととした。
- ・ (1)については、物質管理記録をレビューしていくつかの問題点が明らかとなった。例えば、物質管理記録にはサブプレッションプールに持ち込まれるタオルのバッグは明記されていたものの、持込量や使用量は記入されていなかった。そのため、設置者は、物質管理手順の強化と異物除去手順のレビューを行うこととした。

5. Information Notice 95-47

[発行年月日] 1995年10月4日

[タイトル]

逃し安全弁の予期せぬ開動作及びサブプレッションプールストレーナ閉塞

[状況説明]

1995年9月11日、100%出力運転中、Limerick-1号炉の制御室で、逃し安全弁(SRV)1個(SRV-"M")の開を示す警報表示が発せられ、緊急時手順が実行された。同弁を閉じようとしたが成功せず手動スクラムが開始された。SRVが開く前、設置者は、SRVの漏洩によりサブプレッションプールに放出された熱を除去するため、RHRループ"A"によるサブプレッションプール冷却を行っていた。

このプラントには、Target Rock社製の2段縦置型SRVが設置されている。この弁設計は、Limerickに特有の特殊なもので、復水が主弁の弁座に集まるようになっており、主弁の漏洩問題が頻繁に起こる原因であると信じられている。他のプラントでも類似の設計のTarget Rock社製SRVが用いられているが、復水が弁座に集まらない横置型のものである。復水の排水を促進するよう弁体の変更が行われてきたにも拘らず、主弁の弁座からの漏洩問題は依然残っていると考えられた。

スクラム直後、SRVが開いた状態で、RHRループ"B"によるサブプレッションプール冷却が始められた。運転員は、SRVを閉じて原子炉クールダウン速度を低下させる努力を続けた。約30分後、ループ"A"でモータ電流と流量の変動が認められたため、キャビテーションが起こったものと考え同ループを停止した。ポンプ"A"を調べた後、再起動させたところ、流量は定格流量の極く僅かに(8kl/m)であったが、特に問題が認められなかったため、流量を徐々に32kl/mまで増やし、一定流量でポンプ運転を継続した。しかし、ポンプ吸込側の圧力ゲージには緩やかな低下が観測された。この原因は、サブプレッションプール内のポンプ吸込ストレーナ部で圧力損失が増加したことによると考えられた。その約30分後、吸込圧力は落ち着いた。

[議論]

逃し安全弁

1994年3月の燃料取替後にプラント起動したところ、3個のSRV("F", "M", "S")から漏洩があった。これらの弁はプラント再起動前に、分解検査され再設置されたものであり、その際には漏洩はなかった。しかし、2個のSRV("M", "S")は、3550kPaでの試験時に開閉

されていた。SRV "M"が開く前に、2個のSRV("D", "L")でも漏洩が観測された。漏洩の原因は主弁の弁座によるものと考えられた。1995年9月11日の原子炉停止後、SRV "M"開の根本原因を調べるために漏洩のあった弁を取り外し検査を行った。SRV "M"では、パイロット弁からの漏洩が明かとなったが、他の4個の弁は主弁からの漏洩であった。SRV "M"を分解したところ、パイロット弁のディスクにかなりの侵食が認められた。パイロット弁の弁座及びディスクはステライト鋼製であり、ひどい侵食を受けることは予想されていなかった。設置者は、漏洩のあった5個のSRVを交換し運転を再開した。漏洩がパイロット弁から生じたのか、主弁から生じたのかを明らかにするための検討を行っているが、結果が明らかになるまでの間、漏洩はパイロット弁から起こるものと仮定して、SRVのテール配管温度を監視し、テール配管温度が135°Cに達した段階で原子炉を停止することとなった。

サプレッションプール

1986年の運転開始以来、Limerick-1号炉ではサプレッションプールの清掃が一度も行われておらず、1996年の燃料取替時に行うこととなっていた。2号炉では1995年の燃料取替の際に行われた。プラントクールダウン後、ストレーナ及びプールの状態を調べるために、ダイバーが1号炉のサプレッションプールに潜った。サプレッションプール冷却ループ"A"の吸込ストレーナは、繊維性物質とスラッジ（堆積物）からなる薄いマット状の物質で覆われていたことが判明した。ループ"B"のストレーナも同様の物質で覆われていたが、その程度は"A"ほどひどくなかった。これら2基のストレーナはSRV漏洩時にサプレッションプール冷却に使用されたループに付いていた。他のストレーナには、スラッジが点在して付着していた。ストレーナ表面のデブリはブラシで落とされ、サプレッションプールの床と水は仮設のフィルター系で洗浄された。サプレッションプール冷却系が作動中、プール水中の繊維性物質がストレーナに付着し、さらに、繊維性物質がマット状になったことにより、ストレーナのフィルター作用が増しスラッジや他の物質を表面に集める結果となったものと考えられる。SRV開によるブローダウンがストレーナ表面での蓄積を促進したか否かは不明である。1号炉のプールから約635kgのデブリが除去された。以前には、2号炉のプールからほぼ同量の物質が除去されている。分析により、スラッジは主として酸化鉄であり、また、繊維性物質は高分子量の化合物であることが判明した。繊維性物質の発生源は、同定されていないが、サプレッションプールに固有のものではないと判断されている。繊維ガラスやアスベスト繊維の痕跡はなかった。

6. Information Notice 96-59

[発行年月日] 1996年10月30日

[タイトル]

デブリによるLOCA後再循環冷却機能低下の可能性

[状況説明]

Nine Mile Point-2炉 (MARK-II型格納容器BWR)

1996年10月17日、設置者は、ドライウェルとサプレッションチェンバーとの間の下降管（ダウンカマ）部から、かなりの量のデブリが発見されたことを報告した。17本の下降管からデブリが見つかったが、そのうちの7-8本の下降管は原子炉容器下方に位置し、開口部に泡ゴム製カバーが取り付けられていた。デブリの一部は下降管内水面上に浮遊しており、泡ゴム製カバー片、ビニール袋、タイゴン管、ヘルメット等から構成されていた。なお、前回の燃料取替時にサプレッションプールの清掃が行われていた。

LaSalle-2炉（MARK-II型格納容器BWR）

1996年10月16日、設置者は、サプレッションプールの清掃時に、スラッジ（炭素鋼配管から発生する錆粒子）層の下にかなりの量の異物が発見されたことを報告した。また、異物は下降管からも見つかった。これら異物には、ゴム製マット、ガスケット材シート、ナイロン製バッグやスラッジが含まれていた。設置者は、これらの異物が、多重性のあるECCSストレーナの閉塞限界を超えるのに十分な量であったものと結論づけた。なお、同炉のサプレッションプールは、以前にも検査されストレーナの清掃も行われていた。

[議論]

1995年10月17日、NRCは、Bulletin 95-02を発行し、BWR設置者に対して、サプレッションプールを水源とするECCS及びその他のポンプの作動性をレビューするよう要求した。設置者の評価は、サプレッションプールの清掃状況、吸込ストレーナの状態、及び、異物除去方法の有効性の観点から行うこととなった。さらに、設置者は、格納容器から異物を取り除くために、必要に応じ、手順書の変更やプール清掃等の対策を講じると共に、適切な試験や検査を行って、格納容器の清掃状態を確認することとなった。Nine Mile Point-2号炉とLaSalle-2号炉の設置者は、このBulletin 95-02の要求に従って徹底的な検査を行った。

NRCは、ストレーナの閉塞による再循環機能の喪失に関して、これまでに、数多くの規制関連書簡を発行してきたが、上記の事例も、これまでに発行された書簡と同様、徹底した格納容器の清掃を行うことの必要性を明示している。目視検査や局所的な清掃では、異物が完全に取り除かれたことを確認できないと考えられている。

7. Bulletin 93-02及びSupplement 1

[発行年月日] 1993年5月11日

[タイトル]

ECC吸込ストレーナのデブリによる閉塞

[目的]

本Bulletinは、軽水炉におけるLOCA後のECCS再循環フェーズでのNPSH喪失の可能性について、これまでに認識されていない寄与因子を通知するものである。

[背景]

1985年12月3日、NRCはGeneric Letter 85-22を発行し、その中で、規制指針RG1.82改訂版を、断熱材の変更を取扱うための10CFR50.59レビューに対するガイダンスとして使用す

べきであると勧告した。規制指針RG-1.82改訂版では、繊維性デブリによるストレーナの閉塞を論じている。1992年9月30日、NRCは、Information Notice 92-71を発行し、安全弁からの蒸気放出による鉱物綿性断熱材の脱落とそれによるECCSストレーナ2基の閉塞に関する情報を提供した。1993年4月26日、NRCはInformation Notice 93-34を発行し、この中で、デブリによるストレーナ閉塞に関する2件の事例を紹介した。1件は、サブプレッションプール内のストレーナの損傷及び閉塞に関連するデブリが発見された事例であり、もう1件は、PWRにおいて格納容器サンプのデブリスクリーンを通過する流量を減少させるような物質が発見された事例である。

[状況説明]

Information Notice 93-34及びそのSupplement 1では、Perry炉で発生したECCSポンプ吸込ストレーナの閉塞事象を取り上げている。この事象は、1993年3月に起こっており、RHRのストレーナにフィルター繊維が堆積したという事例で、その2ヵ月前にはストレーナを交換しサブプレッションプールの清掃が行われていた。IN 93-34の発行後、設置者は、ストレーナのデブリを化学分析したところ、このデブリがドライウエル冷却系フィルターのガラス繊維と、これによりプール水からフィルター除去された腐食生成物から成ることが判明した。サブプレッションプール内の堰近くでも、繊維性フィルター材が少量発見された。

ドライウエル冷却系のエア戻り配管に取り付けられていたフィルターには繊維材が用いられていた。また、この他に、格納容器内には同様のエアフィルターが6基設置されていた。こうしたフィルターは、原子炉停止時における格納容器／ドライウエル内雰囲気的清浄維持を目的としたもので、各停止期間の最後にフィルター材を交換し、運転中はそのままの状態を使用するというのが通常のやり方であった。1993年の事象の結果、設置者は、起動前に格納容器／ドライウエルからフィルターを取除くこととなった。また、格納容器内のプールスウェル領域に繋がる配管から繊維性断熱材を取り外すこととなった。さらに、Perry炉では、ドライウエル、サブプレッションプールの徹底的な清掃を行い埃塵や異物を取除く作業が行われた。また、RHRストレーナの差圧を定期的に監視するためのプログラムを開始した。流路面積を大きくしたストレーナに交換し、さらに、閉塞が起こった際のバックフラッシュの方法と機器の利用について手順書を策定した。

[議論]

10CFR50.46では、各プラントには長期冷却能力を有するECCSを設置するよう要求している。LOCAに対して、この長期冷却能力は、BWRではサブプレッションプールからの冷却材再循環、PWRではサンプから圧力容器への冷却材再循環により達成される。

NUREG-0897改訂版は、USI A-43の解決策と共に書かれており、LOCA時における繊維性断熱材の格納容器からストレーナへの移送について言及している。USI A-43の解決策の一部は、繊維性断熱材に関するストレーナの圧力損失試験に基づくものであったが、繊維性物質のストレーナでのフィルター作用による圧力損失への影響はその範囲外であった。NRCは、Perry炉の経験と海外の事例との関連を系統的に評価するためのプログラムを立案中である。

このプログラムには、ストレーナの表面積、格納容器内の清掃、サブプレッションプール水の清浄、及び、ストレーナ閉塞に対する対応策が含まれている。

Perry炉の事例は、腐食生成物、埃塵、及び、ドライウェルからの流入デブリのフィルター作用によって、ECCSポンプのNPSH喪失に至る可能性があることを示した。繊維性エアフィルターや他の仮設材が、こうした繊維性物質の源であると考えられる。このBulletinは、格納容器内におけるこうした繊維性物質の存在について言及する。

[要求される対応策]

設置者は、以下の対策を採るよう要求されている。

- ・ 一次格納容器内に設置されている繊維性エアフィルターや、繊維性物質を用いた仮設材で、LOCA時に耐えられるように設計されていないものを明らかにすること
- ・ ECCSの性能を担保するための対応策を早急に講じること
- ・ 上記に示したような繊維性物質を早急に取除くこと

NRCは、LOCAの発生可能性が低いことから、次の停止時あるいは120日以内の早い時期に、こうした物質の取除き作業を行うこととした。なお、現在停止中である場合には、再起動前に取除き作業を行うよう要求した。

[報告要求]

講じられた全ての対策は、以下の文書にて報告することが要求される。

1. このBulletin発行から30日以内に、要求された対応策が既に講じられているか、あるいは、今後講じられるかを記した文書を提出すること。上記の繊維性物質の使用が明らかになった場合には、その使用場所や使用量、補償対応策、及び、それらの除去作業スケジュールを文書にて回答すること。
2. 要求された対策を終了して30日以内に、完了確認のための文書を提出すること。
3. このBulletinで要求された対策を講じる必要がないと判断する場合には、このBulletin発行から30日以内に、その代替案とその妥当性（要求された対策からのずれに対する正当性）をNRCに文書で回答すること。

(Supplement 1)

[発行年月日] 1994年2月18日

[タイトル]

ECCS吸込ストレーナのデブリによる閉塞

[目的]

本Supplementの目的は以下の通りである。

- (1) BWRのECCS吸込ストレーナ及びPWRの格納容器サンプが、LOCA後のECCS再循環フェーズにおいて閉塞するという弱点に関して、方策と情報を提供すること。
- (2) ECCSストレーナの閉塞という弱点に関して本Supplementで議論されている情報を考慮しECCSの信頼性を確保するための対応策を検討するよう要求すること。

(3) 要求された対応策が採られるか否か、及び、その対応策がどの程度のものかをNRCに報告すると共に、それが何時終了するかをNRCに通知するよう要求すること。

[背景]

断熱材デブリによるLOCA後の再循環機能喪失の可能性に関するNRCの見解は、Generic Letter 85-22(1985年12月3日発行)に示されており、その中では、USI A-43に対する解決策を提示している。その時点で、NRCは、設置者や建設許認可保持者に対して新たな要求項目を課しないと結論づけると共に、規制指針RG1.82改訂版を、一次冷却系配管/機器の断熱材の変更に関する10CFR50.59のレビューガイダンスとして使用すべきであると勧告した。NUREG-0897改訂版には、USI A-43に関する技術的見解が示されており、規制指針の改訂の際の主たる参考資料とされた。

1985年以降、NRCはこの問題に関していくつかのInformation Noticeを発行してきた。

1988年5月19日、Information Notice 88-28を発行し、この中で、ドライウェル内断熱材の劣化と断熱材アルミニウム被膜によるLOCA時のECCSストレーナ閉塞の可能性に関し、10CFR21に基づいて報告された項目を議論している。

1990年1月30日、Information Notice 90-07を発行し、NUKON社製断熱材を高温・アルカリ雰囲気曝した実験について議論している。これらの実験の結果、pHが高くなると、ガラス繊維が圧縮され流路面積が減少することによって、24時間後には断熱材両側の圧力損失が著しく大きくなることが判明した。

1992年9月30日、Information Notice 92-71を発行し、同年7月28日にスウェーデンのBarsebaeck-2号炉で起こったECCSストレーナ2基の閉塞事象を紹介した。ストレーナの閉塞は、逃し弁からの蒸気放出による鉍物綿性断熱材の脱落した結果発生した。格納容器スプレーポンプの吸込側に設置されている5基のストレーナのうち2基が供用中であり、鉍物綿により部分的に閉塞した。事象発生後70分で、これら2基のストレーナの両側の差圧が大きくなったため、運転員は原子炉を停止し、ストレーナのバックフラッシュを行った。

1993年4月26日と5月6日、Information Notice 93-34及びそのSupplement 1を発行した。この中では、Perry炉で発生した2件の事例を含む、デブリによるECCSポンプストレーナの閉塞事例を数件紹介した。Perry炉における最初の事象は運転時に生成されたデブリによるRHRストレーナの閉塞であり、2番目の事象はフィルター繊維のRHRストレーナへの付着である。このデブリは、サブプレッションプールに誤って落下した仮設のドライウェル冷却フィルターのガラス繊維とプール水中の腐食生成物であった。

この事象に対して、1993年5月11日、Bulletin 93-02を発行し、PWR及びBWR設置者に、以下の要求を課した。

- (1) LOCA時に耐えられるように設計されていない繊維性エアフィルターや他の繊維材で格納容器内に設置されているものを明らかにすること、
- (2) こうした繊維材を除去するための対策を迅速に行いECCS性能を確保すること。

これら2件の事例について、Perry炉設置者は、吸込ストレーナの流路面積を $1.9m^2$ から

3. $9m^2$ に増やしたり、吸込ストレーナにバックフラッシュ機能を設けたり、さらに、サブプレッションプール水の清浄を徹底的に行い管理するための改善策を検討する等いくつかの対策を講じた。

[状況説明]

Barsebaeck-2号炉の事象後、NRCは、米国内の全BWRに対して、駐在検査官からの各BWR設計情報と一般的なBWR特性（例えば、ドライウェル内の蒸気管の距離等）に基づき、概算を行った。この計算により、米国BWRの大破断LOCAシナリオにおいてECCSポンプのNPSH喪失の可能性が明かとなった。

一方で、スウェーデンや他の欧州諸国の規制当局は、LOCA起因デブリによるECCS冷却機能喪失に関する前兆事象として、Barsebaeck-2号炉の事例をレビューした。また、(1)蒸気ジェットで破損する断熱材の量、(2)その結果生じるデブリの組成、(3)サブプレッションプールに移送されるデブリの量、(4)ストレーナ表面に付着する断熱材デブリの量、及び、(5)閉塞したストレーナ両側の圧力損失、の評価を目的とした実験と共に、安全性の再解析を実施した。NRCは、この実験／解析から得られた結果と、USI A-43の解決策の一部であるNUREG/CR-2982改訂版の情報との比較を行った。その結果、USI A-43のサポートとして行われた米国の実験で用いた断熱材の破損評価方法が、大破断LOCAシナリオを代表していない可能性のあること、及び、NUREG-0897に報告されているような配管破断で生じる蒸気ジェットにより発生するデブリの量が過小評価されていることが明かとなった。また、Information Notice 93-34に報じられているPerry炉の2回目の事象により、小さな粒子が繊維性デブリと結合してストレーナ両側の圧力損失を著しく増大させることが示された。さらに、NRCは、LOCA起因デブリのNPSHへの影響をより正確に評価するために、BWR-4をモデルとしたプラント固有評価を行った。この評価結果は、1994年1月20日に発行されたNUREG/CR-6224ドラフト報告書”LOCA起因デブリによるBWRのECCSストレーナ閉塞に関するパラメータ評価”に纏められており、LOCAによる断熱材の脱落及びそのデブリのストレーナへの移送後、ECCSポンプのNPSH裕度が不適切になる可能性を示した。なお、この評価では、(1)腐食生成物や他の粒子の影響（Perry炉の事例や実験においてストレーナの圧力損失を増大させることが示されている）、(2)ストレーナ表面でのデブリの圧縮（Barsebaeck-2号炉の事例や欧州での実験において観察されている）、及び、(3)破断配管以外の配管からの断熱材の脱落（即ち、近傍の配管への蒸気ジェットの衝撃による断熱材の脱落）を考慮していない。

1994年1月26-27日にスウェーデンのストックホルムで開催された”Barsebaeck事象に関するOECD/NEAワークショップ”において、BWRのストレーナ閉塞の防止策／緩和策について議論がなされた。これらの対策には、格納容器内の断熱材材質を鉱物綿から繊維ガラスや反射金属に変更する、ストレーナの流路面積を $5m^2$ から $100m^2$ に広げる、事故時にストレーナ両側の差圧をモニタするための計装を設置する、ストレーナのバックフラッシュ機能を設ける（あるいは改良する）、この種の問題に適切に対応するために非常時運転手順書に

ガイダンスを明記する等が含まれている。

また、NRCは、BWR所有者グループ(BWROG)と問題解決のための討議を行ってきたが、BWROGは、NRCに対して暫定措置を提示すると共に、問題が解決するまでの間運転を継続するための基礎となる2つの解析結果を示した。

[議論]

10CFR50.46では、各PWR、各BWRには、LOCA後の長期冷却能力に関する計算結果が規制の容認基準を満足するように設計されたECCSを設置するよう要求している。こうした計算は、単一故障を仮定して行われる。最近の運転経験から、断熱材、腐食生成物及び他の粒子がECCSポンプのストレーナに過度に蓄積することによってECCSの共通原因故障を引き起こす可能性のあることが実証された。設置されている断熱材、ストレーナあるいはデブリスクリーンのサイズやNPSH裕度が多種多様であることから、NRCは、これらの問題をプラント固有のものと考えている。

Barsebaeck-2号炉やPerry炉で発生した事象、及び、米国内外の実験や解析から得られる情報を基に、NRCは、ストレーナ閉塞問題について議論することが重要であると考えている。特に、BWR-4をモデルとして行ったプラント固有の解析結果やストックホルムでの会合から得られた情報から明らかになった現象については、その検討が終了し適切な対策が実施されるまでの間、暫定措置を講じることの重要性が認識されている。これらの現象には、腐食生成物や他の粒子によるECCSストレーナ両側の圧力損失の増加や、ストレーナへのデブリ圧縮の影響が含まれている。

なお、PWRについて、NRCは、サンプスクリーンの表面積が大きいため、当面は対応策の必要性を決めるための検討を行うこととし、それまでは何の措置も講じる必要はないものと考えている。

NRCは、起因事象の発生確率が低いことから、下記の暫定措置が適切であると考えている。

[要求される対応策]

NRCは、この問題に関する最終解決策を保留していることから、LOCA後のストレーナ閉塞によるECCS機能喪失を防止／緩和する能力を高めるために以下の暫定措置を行うよう要求している。

- ・ 本Bulletin及び関連のInformation Noticeにおけるサプレッションプール内ストレーナ閉塞の可能性に関する情報を、運転員や他の関係者（緊急時対応のための職員）に伝えるための訓練や文書を用意すること。
- ・ 緊急時運転手順書により運転員がECCSストレーナの閉塞に気付くことができるのを確認し、さらに、緩和のためのガイダンスを用意すること。
- ・ LOCA時にNPSH裕度の喪失を防止、遅延、緩和させるための対策が分かるよう手順書や対応を策定すること。こうした対応は、炉心及び格納容器の冷却のための非常用系統機能との整合性をとる必要がある。炉心及び格納容器の冷却を確認するための対策には以下の項目が含まれる。

- 圧力損失の低減とデブリ付着にかかる時間の引き延ばしを図るためにストレーナ流量を減少させること（要求されているECCS流量と矛盾しない）。
- 閉塞したストレーナのバックフラッシュを行うために既存システムに運転員を再配置すること。
- サプレッションプール以外の水源から炉心に冷却材を注入するために既存システムに運転員を再配置すること。
- ストレーナへのデブリ移送を軽減するために格納容器スプレーを間欠運転すること。
- プラントの設計基準を満足するために炉心及び格納容器の冷却機能を確保するための対策をプラント個別に検討すること。

これら要求された暫定措置は、このBulletin発行から90日以内に行うものとする。また、この問題の最終解決策を得るために、BWROGに協力することが設置者に要請されている。

[報告要求]

設置者は、以下の文書を提出するよう要求される。

1. このBulletin発行から60日以内に、要求された対応策に従う意向があるか否か、計画されている対策の記述、及び、実施スケジュールを記した文書を提出すること。要求された対策を講じる意向がない場合には、代替策を提示し、その内容、実施スケジュール及び要求された対策との違いに対する妥当性を記した報告書を提出すること。
2. 要求された対策を終了して30日以内に、完了確認のための文書を提出すること。

8. Bulletin 95-02

[発行年月日] 1995年10月17日

[タイトル]

サプレッションプール冷却モード時における残留熱除去系ポンプ吸込ストレーナのデブリによる閉塞の可能性

[目的]

本Bulletin発行の目的は、以下の通りである。

- (1) 設置者に対して、サプレッションプール冷却モード作動時における逃し安全弁(SRV)開固着と、それに引き続いて発生する残留熱除去系(RHR)ポンプ吸込ストレーナの閉塞事象に注意を促すこと。
- (2) サプレッションプールを水源とする非常用炉心冷却系(ECCS)等のポンプが安全機能を果たしている間に、その作動性能をレビューするよう要求すること。設置者による評価は、サプレッションプールの清浄、吸込ストレーナの清掃及び異物除去の方法の有効性に基いて行うものとする。さらに、サプレッションプール、ドライウェル及び格納容器内の異物を最小限に抑えるために、設置者は、手順の改訂やサプレッションプールの清掃など適切な対策を採るよう要求される。また、適切な試験や検査を行ってポンプの性能を評価するよう要求される。

- (3) 要求された対策を講じるか否か、また、どの程度の対策を講じるかをNRCに報告すると共に、その対策に関する確認試験及び検査の結果を示す報告書あるいはその代替案の完了を示す報告書をNRCに提出するよう要求すること。

[背景]

1995年9月11日、Limerick-1号炉において、定格出力運転中、制御室で逃し安全弁SRV-Mの開を示す警報表示が発せられた。SRV閉操作を試みたが失敗したため、原子炉の手動スクラムが開始された。SRVが開く前、設置者は、SRVからの漏洩による崩壊熱を除去するためサブプレッションプール冷却(SPC)ループ“A”を作動させていた。手動スクラム直後、SPCループ“B”が起動された。運転員は、SRVの閉止操作とクールダウン速度の低下操作を続けた。約30分後、ループ“A”でポンプモータ電流と流量の変動が認められた。キャビテーションが発生したものと判断され、同ループが停止された。ループ“A”ポンプを検査し再起動させ、その後、流量を定格の32 kl/minまで上げた。特に異常が認められなかったため、ポンプの運転を続けた。この間、ポンプ吸込に取り付けられた圧力ゲージの指示が徐々に低下するのが認められたが、この原因はサブプレッションプール内ストレーナ部での圧力損失の増加によるものと考えられた。約30分後、吸込圧力が安定したため通常の停止操作が行われた。

[議論]

Limerick-1号炉では、1986年に商用運転を開始してから一度もサブプレッションプールの清掃を行っていなかった。プール清掃は1996年の燃料取替時に行う予定であった。SRVの漏洩があったため、数カ月間、RHRループ“A”及び“B”を用いてSPCを行ってきた。従来は、SPCにループ“A”のみ用いることとなっていたが、約3ヶ月前からループ“A”と“B”の両方を用いるよう運転方法が変更された。原子炉のクールダウン後、サブプレッションプール内に潜ってストレーナの状態とサブプレッションプール内の清掃状態を検査した。ループ“A”の吸込ストレーナは2基とも繊維とスラッジから成るマット状の膜で覆われていた。ループ“B”のストレーナも同様の膜で覆われていたが、その程度はループ“A”ほどひどくなかった。ループ“B”のストレーナ1基は約75%が膜で覆われていたが、もう一方は極く僅かの範囲であった。他のストレーナには、腐食生成物(スラッジ)が付着していた。そのため、ストレーナとプールからデブリを取り除き、仮設のフィルターを用いてプール水の洗浄を行った。SPCの作動中、プール水中の繊維がストレーナ表面に付着し、この繊維によりフィルター作用が助長されスラッジやその他の物質をストレーナ表面上に集めたものと思われる。設置者は、SRVの開によるブローダウンがストレーナ表面でのデブリ堆積を促進させたのではないと結論づけた。事象後、1号炉のプールから約635kgのデブリが除去されたが、これは、以前に2号炉のプールから除去された物質の量と同等であった。分析により、スラッジは主として酸化鉄であり、また、繊維性物質は高分子量の化合物であることが判明した。繊維性物質の発生源は、同定されていないが、サブプレッションプールに当初から存在していたものではないと判断されている。繊維ガラスやアスベスト繊維の痕跡はなかった。さらに、

プール内では他の異物(木片、釘、ホース等)も見つかった。このため、設置者は、サブプレッションプール及びドライウエル内の物質管理を強化するため異物除去方法を改良することとした。

10CFR50.46では、設置者に対して、LOCA後の冷却性能が5つの基準を満足するようにECCSを設計するよう要求している。その1つは、炉心内に保持される長寿命の放射性核種による崩壊熱を除去し炉心温度を許容される範囲内に維持することができるようECCSに長期冷却能力を持たせることである。ECCSは、最悪の単一故障を想定して、この基準を満たすよう設計される。Limerick-1号炉の事例により、通常運転時におけるストレーナ表面での異物、デブリ及び腐食生成物の蓄積は、サブプレッションプールの清掃状態に大きく依存しLOCA後のECCSによる長期冷却を阻害し得るものであることが示された。NRCは、プール内のデブリがECCS性能に悪影響を及ぼさないことを確認するために、設置者が、下記の対策を講じるべきであると結論づけている。

規制条件を満足し、特に、長期冷却機能が10CFR50.46に合致していることを確認するために、設置者はこの種の問題を解決する必要があると結論づけている。

Limerickの事象が発生する前に、NRCは、Bulletinのドラフト(Bulletine 95-xx : Potential Plugging of Emergency Core Cooling Suction Strainers by Debris in Boiling Water Reactors)を発行したが、この中で取り上げている問題は本Bulletinで取り上げているものとは異なっている。即ち、ドラフトではLOCA起因のデブリによるECCSストレーナ閉塞の可能性を論じているのに対し、本Bulletinでは通常運転時のサブプレッションプール内デブリによるECCSストレーナ閉塞の可能性を議論している。

[要求される対応策]

通常運転時にデブリの蓄積によるストレーナの閉塞が起こらないことを確認するために、設置者は、以下の対策を講じるよう要求されている。

- (1) サプレッションプール及びストレーナの清掃状態に関する評価を基に、サブプレッションプールから取水するポンプ(ECCSや格納容器スプレー等)の作動性能を確認すること。清掃状態の評価は、プール及びストレーナに対する直前の検査あるいは清掃時の状態と、ストレーナの閉塞を引き起こし得るデブリの流入の可能性に基づいて行うものとする。
- (2) 上記の対策における作動性能評価は、本Bulletin発行から120日以内に、適切な試験及びストレーナ検査を行うことによって確認するものとする。
- (3) サプレッションプール清掃を計画すること。清掃計画は、上記(1)の対策における作動性能評価と矛盾しないものとする。さらに、定期的な清掃プログラムを策定するものとし、その中には、清掃の方法、適切な清掃頻度の決定基準、及び、清掃程度の適性評価基準を含めるものとする。
- (4) サプレッションプール、ドライウエル及び接続する系統内の物質管理が適切か否かを判断するために、異物除去方法及びその実施をレビューすること。このレビューでは、

ECCSの作動に影響を及ぼし得る物質がプール内に流入するのを防ぐために適切な異物除去管理が行われてきたか、また、作業員がそれぞれの責務を十分周知していたかを検討するものとする。弱点が見つかった場合にはそれを改善することとする。さらに、異物除去管理の有効性及び弱点によるECCS性能への影響を評価するものとする。

- (5) プール水のサンプリングやポンプ吸込圧のモニタリング等の測定方法を新たに検討すること。

[報告要求]

設置者は、以下の文書を提出するよう要求される。

- (1) 本Bulletin発行から30日以内

・要求された対策をどの程度の範囲で講じるかを示す報告書

これには、対策の詳細な記述、評価結果、試験及び検査計画を含むものとする。また、プール清掃のスケジュール及びその根拠、ストレーナ閉塞を防止および検出するための方法に関する記述を含むものとする。もし、設置者に、本Bulletinで要求した対策を講じる意向が内場合には、代替策に関する記述、その実施スケジュール、及び、それを採用する根拠を報告書に纏めることとする。

- (2) 要求された対策/代替策の実施あるいは確認試験・検査の終了から10日以内

・全てのポンプに対する性能試験及び検査の終了確認及びその結果を示す報告書

9. Bulletin 96-03

[発行年月日] 1996年5月6日

[タイトル]

BWRにおけるECC吸込ストレーナのデブリによる閉塞の可能性

[目的]

本Bulletin発行の目的は、以下の通りである。

- (1) LOCA時に発生するデブリによってECCSサブプレッションプール吸込ストレーナが閉塞する可能性を最小限に抑えるために、設置者に対して、手順の改訂やプラントの設計変更など適切な対策を採るよう要求すること、及び、
- (2) 要求された対策を講じるか否か、また、どの程度の対策を講じるかをNRCに報告すると共に、それが何時完了するかについてNRCに通知するよう要求すること

[背景]

1992年7月28日、スウェーデンBWR、Barsebaeck-2号炉でECCS吸込ストレーナ2基が閉塞するという事象が発生した。ストレーナの閉塞は、逃し安全弁(SRV)誤開の際の蒸気噴出により脱落した鉋物綿製断熱材によるものであった。格納容器スプレーポンプ吸込側にある5基のストレーナのうち2基が供用中であり、鉋物綿によって部分閉塞を起こした。事象発生後70分で、両ストレーナ部で差圧が大きくなったため、運転員は格納容器スプレーポンプを停止しストレーナのバックフラッシュを行った。この事象では、断熱材デブリが発

生しサブプレッションプールに移送されECCSストレーナの閉塞を引き起こす可能性が実証された。

1993年1月16日と4月14日に、米国BWR、Perry炉においてECCSストレーナの閉塞を伴う事象が発生した。最初の事象では、サブプレッションプール内のデブリにより残留熱除去系(RHR)ポンプの吸込ストレーナが閉塞した。2度目の事象では、ストレーナ表面にフィルター繊維の吸着が認められた。このデブリは、サブプレッションプールに落下した仮設のドラウエル冷却器フィルターのガラス繊維と、そのフィルター作用によってストレーナ表面に蓄積した腐食生成物から成っていた。この事象では、ECCS吸込ストレーナ表面に付着した繊維ガラスのフィルター作用によりサブプレッションプール内の腐食生成物や沈澱物が蓄積し、ストレーナ部の圧力損失に悪影響を及ぼすことが実証された。一般に、米国内のBWRにおいては、こうした腐食生成物は大量に存在する。BWR所有者グループ(BWROG)とNRCは、このフィルター作用を評価するために、個別の試験プログラムを行ってきた。

これらの事象に基づき、NRCは、1993年5月11日、Bulletin 93-02を発行し、設置者に対して、LOCA時に耐え得る設計となっていない仮設の繊維物質や繊維性エアフィルターを格納容器から取り除くよう要求した。さらに、ECCSの性能を担保するために必要な対策を早急に講じるよう要求した。

これらの事象後、NRCは、米国内の各BWRにおける弱点を評価するための計算を実施した。その結果、LOCA時に発生するデブリが原因でストレーナが閉塞することにより、ECCSポンプのNPSH裕度が失われる可能性のあることが判明した。さらに、NRCは、MARK-I格納容器を有するBWR-4プラント1基を対象に詳細な評価を行った。その結果は、1994年8月に発行されたNUREG/CR-6224ドラフト報告書に纏められている(最終報告書は1995年10月に発行)。

また、1994年1月26-27日にスウェーデンのストックホルムで開催された「Barsebaeck-2号炉事例に関するOECD/NEAワークショップ」会合では、各国の代表がBWRのストレーナ閉塞の発生防止あるいは影響緩和のために講じた、あるいは、計画した対策について議論がなされた。この会合における情報と上記の評価結果に基づき、NRCは、1994年2月18日、Bulletin 93-02 Supplement 1を発行し、BWR設置者に対して、十分時間をかけて恒久的な対策を検討することができるよう、その間ECCSの信頼性を担保するための暫定措置を講じるよう要求した。さらに、LOCA時の再循環フェーズにおける閉塞という観点から、PWRの格納容器サンプ及びBWRのECCS吸込ストレーナの弱点に関する情報を設置者に通知した。

1995年9月11日、Limerick-1号炉において、定格出力運転中、逃し安全弁(SRV)の開を示す警報が制御室で表示された。運転員は、同弁を閉じようとしたが成功せず、原子炉の手動停止操作を開始した。SRVが開く前、設置者は、SRVからの漏洩によりサブプレッションプールに放出された熱を除去するため、残留熱除去系(RHR)ループ“A”によるサブプレッションプール冷却(SPC)を行っていた。手動スクラム直後、運転員は、SRV開の状態でもRHRループ“B”によるSPCを開始した。運転員は、SRVを閉じて原子炉のクールダウン速度を下げるための操作を継続した。約30分後、ループ“A”で、モータ電流と流量の変動が認められたため、

キャビテーションが起こったものと判断し同ループを停止した。ポンプ“A”を調べた後、再起動させたが、特に問題はなかった。原子炉のクールダウン後、サブレーションプール内に潜ってストレーナの状態とサブレーションプール内の清掃状態を検査した。ループ“A”の吸込ストレーナは2基とも繊維とスラッジから成るマット状の膜で覆われていた。ループ“B”のストレーナも同様の膜で覆われていたが、その程度はループ“A”ほどひどくなかった。分析により、スラッジの主成分は酸化鉄であり、また、繊維性物質は高分子量の化合物であることが判明した。繊維性物質の発生源は、同定されていないが、サブレーションプールに当初から存在していたものではないと判断されている。繊維ガラスやアスベスト繊維の痕跡はなかった。

Limerick-1号炉の事象は、サブレーションプールが適切な清掃状態に保たれていることを確認することの必要性を示した。さらに、繊維性物質以外のものがストレーナを閉塞させる可能性のあることも再認識された。当該事象に対して、NRCは、1995年10月17日、Bulletin 95-02を発行し、設置者に対して、(1)サブレーションプール及びストレーナの清掃状態に基づきECCSの作動性を評価すること、(2)120日以内にポンプの試験やストレーナの検査を行ってECCSの作動性を確認すること、(3)プール清掃プログラムを策定すること、(4)異物除去方法をレビューし不備な部分があった場合にはそれを訂正すること、及び、(5)ECCSのアベイラビリティを担保するために適切な対策を講じること、を要求した。NRCでは、Bulletin 95-02に対する設置者からの対応をレビューしているが、これまでのところ、過去4年間に殆どのプラントでプール清掃が行われていたことが判明している。

Bulletin 93-02及びそのSupplementに対し、設置者は、本Bulletinで要求する対策が講じられるまでプラント運転を継続するために適切な暫定措置を施してきた。具体的には、(1)ストレーナ閉塞事象を緩和するための代替水源の利用可能性、(2)緊急時運転手順(EOPs)にストレーナ閉塞事象を緩和するための適切なガイダンスを明記すること、(3)ストレーナ閉塞事象を緩和するために適切な運転員訓練を行うこと、及び(4)格納容器内に仮設されている繊維性物質を取り除くこと、である。さらに、BWROGが行った安全評価で、代替水源の利用には適切な時間(25-35分)が必要であると結論づけられた。なお、本Bulletinは、ECCSが所定の安全機能を果たしLOCAを緩和するための運転員操作の必要性を最小限に抑えられることを確認するよう要求するものである。

[議論]

NRCの評価により、LOCA時に脱落した断熱材デブリが吸込ストレーナに移送された後に、ECCSポンプの適切なNPSH裕度を保てなくなる可能性の高いことが示された。さらに、NPSH喪失が事象発生後10分以内に起こり得ることが計算によって示された。また、格納容器の形式、ECCS流量、断熱材の材質、プラント内機器の配置、NPSH裕度等プラントの特性に大きなバラツキがあるため、ECCSに対するNPSH裕度の適性はかなりプラント固有のものであることも示唆された。

Barsebaeck-2号炉の事例では、配管破断により大量の断熱材デブリが生成されサブレッ

洗ストレーナの設計)を検討しているが、これらは、ECCSストレーナ閉塞問題の解決に対して本Bulletinで提案している3つのオプションに一致するものである。BWROGは、さらに、(1)ECCSストレーナ閉塞問題解決策の評価に関するガイダンス、(2)技術的に難しい問題の解決に関する標準的な産業界の方法、及び、(3)本Bulletinの要求に合致するガイダンスを電力会社に提供するために、解決策ガイダンス文書(Utility Resolution Guidance : URG)を用意している。NRCは、この文書が最終的な解決策を実施する上で重要な役割を果たすものであると考えており、URGの作成と利用をモニタする予定である。

[要求される対応策]

NRCは、以下に示す3つのオプションを明示したが、設置者は、ECCSが所定の機能を果たすことが確認できれば他の対策を提案することができる。

オプション1：大容量型静的ストレーナの設置

このオプションを採用する場合には、ストレーナの設計では、RG-1.82改訂第2版、Section C.2.2に従って計算されるデブリ荷重によりECCSのNPSHが喪失することがないように十分な容量を有することが要求される。このオプションには2つのメリットがある。1つは静的であることで、運転員の介入を必要としないことである。もう2つは、ECCS流量を阻害することがないということである。このオプションは最もメリットの大きなものであるが、NRCは、LOCA時に発生する水力荷重を考慮してストレーナの支持構造を決定することが困難さであるため、このオプションの実施は極めて難しいと認識している。このオプションを採用した設置者は、必要に応じて、新しいプログラムを作成したり、あるいは、既存のプログラムを変更し、デブリの発生及び移送の可能性が、RG-1.82改訂第2版に従ってデブリ量を推定する際に用いる仮定を常に満足することを確認する必要がある。

オプション2：自洗ストレーナの設置

このオプションは、ブラシや擦り羽根で常時ストレーナの洗浄を行うことによって閉塞を防止するというものである。オプション1と同様、自洗ストレーナの設計は、運転員操作に頼らず、また、ECCS流量を阻害することがない。しかし、このオプションでは、洗浄のための動的機器がLOCA時のサブプレッションプール内環境に曝されるため、その作動性を確保するために適切な対策を施す必要がある。このタイプのストレーナの設置に際しては、(1)燃料交換時ごとにサブプレッションプールからデブリを除去するなどの対策、及び、(2)サブプレッションプールの定期的な洗浄やストレーナの作動性を確認するためのサーベランスの実施といった対策を併せて講じる必要がある。

オプション3：バックフラッシュ機能の設置

バックフラッシュ機能は、ストレーナ閉塞を防止するために、運転員によるストレーナ表面からのデブリ除去操作を必要とする。閉塞事象発生時に運転員が適切に対応できることを担保するために、この機能の設置には、(1)閉塞に至るまでに十分な時間的余裕を持たせるための対策、(2)ストレーナ部での差圧が増加した場合にそれを知らせるた

めの計測警報機器、(3)閉塞事象の認知及び緩和に関する運転員訓練、及び、(4)バックフラッシュ機能及びストレーナ計測の作動性を確認するためのサーベランスの実施、を併せて行うことが必要となる。さらに、運転員が閉塞の発生を認識するのに必要な時間的余裕があり、また、LOCA時の他の対応を考慮して適切な対応が採れることを示すために、RG-1.82改訂第2版、Section C.2.2に適合したバックフラッシュ機能の設置を支援するための解析を行う必要がある。なお、この解析では、予想される頻度でバックフラッシュ運転を繰り返す行ための技術の習得や時間的余裕を運転員に持たせることが要求される。吸込ストレーナ及びバックフラッシュ機能は、ECCS流量の阻害に関してEOPガイダンスと矛盾することのないよう設計する必要がある。例えば、EOPにおいて、全ての利用可能なポンプを作動させる必要があると示されている場合には、バックフラッシュのためにECCS流量が阻害されないことを確認できるよう設計するものとする。また、EOPにおいて、不必要なポンプを停止しても支障がない場合には、当該ポンプの吸込ストレーナに対するバックフラッシュは容認されるものとする。

手動によるバックフラッシュ運転が必要となるタイミングを示すために、ストレーナの差圧やポンプ流量等の計装設備を設置するものとするが、この計装設備はRG-1.97（「事故時あるいは事故後のプラント状態を評価するための計装設備」）改訂第3版に定義されるものであり、プラントの保安規定(technical specification：TS)を満足するものとする。

LOCA時にECCSが安全機能を果たすことを確認するために設置する系統・機器は全てECCSの一部と見なし、ECCSと同様の基準に従って、設計・製作・試験するものとする。この状態を満たさない場合には、技術的な解析によってその正当性を示す必要があり、また、10CFR50.12の要求項目を満足しなければならない。バックフラッシュ機能や自洗ストレーナ等の動的設備は、ストレーナ表面に付着したデブリの除去に対する設計効果を示すような試験データによる裏付けが必要である。オプション1のストレーナについては、性能特性と、ストレーナ表面へのデブリ付着という観点から最悪のシナリオに対処できる能力を立証する試験データで裏付けることが必要である。

1995年7月19日、NRCは、原子力発電炉の保安規定に関し10CFR50.36を改訂した。その一部（パラグラフ(c)(2)(ii)）では、保安規定において運転制限条件(LCO)が要求されるか否かを定めるための4つの基準を示している。その中の基準3では、核分裂生成物の障壁の破損を想定したり、あるいは、その健全性への脅威となるような設計基準事故やトランジェントを緩和するための機器系統や構造物に関するLCOを保安規定に明記されるべきものであると述べている。NRCは、自洗ストレーナ、バックフラッシュ機能及びその支援となる計測設備がこの基準3を満足するものであり、設計基準LOCAを緩和するための設備(ECCS等)に必要な機器として保安規定に含むべきであるとしているものの、こうした機器・系統はECCSの一部であるため、新たなLCOの設定は必要ないものと結論づけた。但し、これらの機器・系統が不作動状態にあった場合についてはECCS全体への影響という観点から解析すべきものである。保安規定は、本Bulletinに対応して設置される機器・系統のサーベラン

スをサポートするためのものであり、オプション2あるいは3が選択された場合には、動的設備のサーベランス試験や目視検査を包含すべきである。設置者が、本Bulletinに対応して、ECCSストレーナの変更が必要ないと判断した場合には、既存のストレーナについてその作動性を担保するための保安規定サーベランスを提案するものとする。その例をAttachment 1に示す。

Bulletin 93-02とそのSupplement 1に対応して採られたプラントの手順や対策は、最終的な改善措置が施されるまでそのまま保持する必要がある。

設置者は、1997年1月1日以後に行われる燃料交換時に対策を講じるよう要求される。

[報告要求]

設置者は、以下の文書を提出するよう要求される。

(1)本Bulletin発行から180日以内

- ・ 要求された対策を講じる意向があるか否かを示す報告書：これには、計画している対策の詳細な記述、実施スケジュール及び保安規定の提案を含むものとする。
- ・ 要求された対策を講じる意向がない場合、その理由に関する詳細な記述：これには、代替案に関する詳細な記述、それを採用する根拠、並びに、保安規定の提案を含むものとする。

(2)要求された対策を終了して30日以内

- ・ 完了確認及び対策の概要を纏めた文書

[Attachment 1：保安規定サーベランスの例]

SR 3.5.1.13	(a) 目視検査によるECCS吸込ストレーナの作動性確認	18ヶ月ごと
	(b) サプレッションプール清掃状態の確認	18ヶ月ごと
SR 3.5.1.14	ECCSポンプ作動時の自洗ストレーナ流量等の性能確認	18ヶ月ごと
SR 3.5.1.15	バックフラッシュ機能の流量等の性能確認	18ヶ月ごと

表 I. 1 米国原子力規制委員会発行の規制関連書簡とその対象事例

規制関連書簡	発行年月日	対象事例 (発成年月日)	記述概要
Information Notice 92-71	1992年9月30日	<ul style="list-style-type: none"> • Barsebaeck-2 : 逃し安全弁誤開に伴う配管断熱材脱落とECCSストレーナー閉塞(7/29/92) 	「サンブ閉塞に関連するリスクはバックファイティングを是認するものではない」という従来の結論を再検討することを提示
Information Notice 93-34	1993年4月26日	<ul style="list-style-type: none"> • Perry : RHR ストレーナーの閉塞及び変形(5/22/92, 1/16/93, 3/26/93) • Grand Gulf : RHRポンプ吸込圧低下(3/18/88, 7/2/89) • North Anna (PWR) : SG塗装の劣化 	安全系へのデブリの影響評価において、通常運転時及びLOCA時のデブリ発生源を考慮することの必要性を示唆
Information Notice 93-34 Supplement 1	1993年5月6日	<ul style="list-style-type: none"> • Perry : (3/26/93) 	格納容器内エアフィルターの落下と移送を例に、繊維性物質のストレーナー付着とそれによる腐食生成物の蓄積について記述
Information Notice 94-57	1994年8月12日	<ul style="list-style-type: none"> • LaSalle-1 : ストレーナーの目詰り(4/26/94, 5/11/94) • River Bend : プール内デブリ検出(6/13/94) • Quad Cities-1 : RHR系でのデブリ検出(1994年7月14日) 	格納容器内での作業により発生するデブリとLOCA起因デブリの組合せによるストレーナー閉塞の可能性を示唆
Information Notice 95-06	1995年1月25日	<ul style="list-style-type: none"> • Palisades (PWR) : スクリュー閉塞の可能性(4/28/94) • Grand Gulf : ストレーナー閉塞の可能性(4/94) • Browns Ferry-2 : ストレーナー閉塞(10/10/94) 	左記の各事象に対して取られた対策について紹介、格納容器内に持ち込まれる物質の管理強化の重要性を指摘
Information Notice 95-47	1995年10月4日	<ul style="list-style-type: none"> • Limerick-1 : 逃し安全弁開固着とRHRポンプ吸込圧力低下(9/11/95) 	左記に事例における逃し安全弁開固着の原因とサブレーションプールの清掃管理について言及
Information Notice 96-59	1996年10月30日	<ul style="list-style-type: none"> • Nine Mile Point-2 : プール内デブリ発見(10/96) • LaSalle-2 : プール内デブリの発見(10/96) 	格納容器の徹底した清掃作業実施の必要性を指摘
Bulletin 93-02	1993年5月11日	<ul style="list-style-type: none"> • Perry : (3/26/93) 	格納容器内に設置されている繊維性エアフィルターや仮設材の同定と除去等の対策を要求
Bulletin 93-02 Supplement 1	1994年2月18日	<ul style="list-style-type: none"> • Barsebaeck-2以後の米国内及び欧州各国における対策検討の結果や現状を紹介 	ストレーナー閉塞によるECCS機能喪失を防止/緩和する能力を高めるための応急措置を行うよう要求
Bulletin 95-02	1995年10月17日	<ul style="list-style-type: none"> • Limerick-1 : (9/11/95) 	各種ポンプの動作性能評価、及び、サブレーションプール清掃や異物除去等の計画や方法の検討を要求
Bulletin 96-03	1996年5月6日	<ul style="list-style-type: none"> • Barsebaeck-2 : (7/29/92) • Perry : (3/26/93) • Limerick-1 : (9/11/95) 	ストレーナー閉塞の可能性を最小限に抑えるための手順改訂やプラントの設計変更等の対策を要求、オプシジョンとして3種類のストレーナーを例示

付録Ⅱ 規制指針1.82改訂第2版の抄訳

ECCS吸込ストレーナの閉塞問題に対応して、1996年5月、米国原子力規制委員会(NRC)は、規制指針RG-1.82を改訂した(改訂第2版)。本付録では、規制指針RG-1.82改訂第2版の抄訳を記載する。なお、以下では、同指針改訂第1版からの変更部分を下線付イタリックで示す。

規制指針1.82改訂第2版(Regulatory Guide 1.82 Revision 2)

1996年5月発行

冷却材喪失事故後の長期再循環冷却水源

A. 序

本指針は、非常用炉心冷却、格納容器熱除去あるいは格納容器雰囲気浄化のための水源であるサンプやサブプレッションプールに関し、一般設計基準(General Design Criteria: GDC)のNo. 1(品質規準及び記録)とNo. 35~40(35:非常用炉心冷却、36:非常用炉心冷却系の検査、37:非常用炉心冷却系の試験、38:格納容器熱除去、39:格納容器熱除去系の検査、40:格納容器熱除去系の試験)の要求を満足するための方法について記述するものである。また、冷却材喪失事故(LOCA)後の長期再循環冷却に対するサンプ及びサブプレッションプールの適性を評価するためのガイドラインを示している。本指針は軽水炉(LWRs)に適用するものである。

本指針は、改訂第1版が、その発行後の運転経験、解析及び研究成果により、吸込ストレーナのデブリ閉塞によるBWRプラントへの影響を評価するのに不十分であったことが示されたため、BWRに対するデブリ閉塞評価ガイダンスの変更を目的として改訂された。

B. 議論

概要

LOCA後の長期再循環冷却に関する安全上の問題は、(1)LOCA起因あるいはLOCA発生以前のデブリ移送によるデブリ除去装置の閉塞、(2)LOCA後の水力的影響、特に、空気の侵入、及び、(3)上記2項目の組合せによる長期再循環冷却ポンプの動作性への影響(ポンプ入口での有効吸込水頭圧(NPSH)への影響)である。

LOCA発生以前から存在するデブリが、非常用炉心冷却系(ECC)のデブリ除去装置(例えば、トラッシュラック、デブリスクリーン、吸込ストレーナ)を閉塞させ、NPSH裕度の低下や喪失を引き起こす可能性がある。こうしたデブリは、(1)LOCA起因でブローダウン流により移送させるもの(例えば、断熱材や塗料)、(2)洗浄により生成、移送されるもの、及び、(3)LOCA発生以前に存在するもの(例えば、サブプレッションプールにおける腐食生成物、外部からの異物及びスラッジ)に分類される。さらに、デブリは、(1)高密度で沈降性は高いが再循環流の流速が局所的に大きい場合に移送されるもの、(2)比重が1.0であり沈降速度は遅いが局所的な流動あるいは低流速で移送されるもの、及び、(3)低密度で浮遊性が高くデブリ除去装置まで移

送される可能性の高いもの、に分けられる。

非常用炉心冷却系(ECCS)によるLOCA後の長期炉心冷却能力が担保されることを確認するために、デブリ生成、初期のデブリ移送、LOCA後長期のデブリ移送及びデブリ除去装置の閉塞を評価しなければならない。断熱材物質(例えば、繊維性、セラミック製あるいは金属製の物質)に限らず、フィルター、腐食生成物、外部からの異物、塗料や被膜材等デブリの発生源は全て評価するものとする。こうした評価に関する情報は、本指針Cの「規制見解(Regulatory Position)」及び本指針の付録Aに示されている。

加圧水型原子炉(PWRs)

PWRでは、LOCA後の原子炉冷却材とスプレー水が、格納容器非常用サンプ(本指針では「ECCサンプ」と呼ぶ)に回収される。従って、サンプは、余熱除去、非常用炉心冷却及び格納容器雰囲気浄化の各種機能に対する長期再循環の水源となり、ポンプの入口及びその間の配管と共に、安全上重要な機器である。ECCサンプの特徴及び関連機器との関係をFigure 1に示す。

PWRにおけるサンプ及びその出口の設計では、空気侵入などの水力的影響が起こらないよう考慮する。空気侵入はECCサンプの出口配管における水深と流速に依存するため、サンプ内での出口位置や形状は空気侵入を最小限に抑えるために重要なパラメータである。

ECCサンプを実用上最も低い位置に設置することにより、再循環冷却材を最大限に利用することができる。格納容器スプレー水が集まる場所にはサンプに繋がるドレンや流路を設け、冷却材がそこに保持されるのを防ぐ。デブリは、ドレンや流路を介してサンプに流入する可能性があるため、デブリのECCサンプへの移送やそこでの蓄積を防止するための対策を講じることが必要となる。

ドレンサンプは、ECCサンプとは別個に、また、ECCサンプより低い位置に設置する。ECCサンプ近傍の床にはドレンサンプへの下り勾配を設け、これによってECCサンプへのデブリ移送・蓄積を最小限に抑える。高密度のデブリはトラッシュラック方向への流れにより床上を移動するが、同ラックの上流にあるデブリ堰によりラックへ到達するデブリの量は少なくなる。

サンプ出口は、地震による振動、LOCA起因の蒸気ジェット荷重や飛来物衝突荷重、及び、デブリの蓄積による差圧荷重等に耐えるだけの強度を備えたデブリ除去装置により保護される必要がある。従って、デブリ除去装置の材質を選定する際には、水に浸かっている期間(休止期間)と、部分的あるいは全体が水に浸かっている期間(運転期間)を考慮する。また、ECCサンプを高エネルギー配管から隔離することも飛来物対策として重要な問題であり、スクリーンやラックを破損配管による衝撃や蒸気ジェット荷重から防護することが必要である。また、ECCサンプやサンプ出口に冗長性を設け、それらを分離することにより、一方の除去装置や出口配管が損傷あるいは部分閉塞した場合、もう一方がその影響を受ける可能性を低減する。

安全注入の終了後、水面はデブリ除去装置の頂部より上方にあるものと予想されるが、水没の程度や、浮遊性デブリの存在量、早期閉塞の可能性は不確かであるため、除去装置の水平方向設置は望ましくない。従って、デブリ除去装置の有効表面積の計算では、水平方向設置の除去装置に対してクレジットはとらない。また、除去装置頂部にはLOCA起因の荷重から守るため

のカバー板と、トラップされた空気を抜くためのベントを設ける。

トラッシュラックを通り抜ける程小さく、また、スクリーンや出口を閉塞させるようなデブリについては、圧力損失への影響を解析する必要がある。スクリーンやサンプ出口の閉塞は、そこへ移送される断熱材デブリの種類と量に依存する。内側のデブリスクリーンを垂直方向に設置することで、その表面へのデブリの付着や沈降を抑え、スクリーン部での流量を最大限に確保することができる。冷却材の流速が大きく移送中にデブリの沈降が起こらない場合には、トラッシュラック開口部を通り抜ける小さなデブリがゆっくりと付着し、スクリーンが閉塞する可能性がある。スクリーン手前での流速が5 cm/sec以下であれば、比重が1.05以上のデブリはスクリーン表面に達するまでに沈降し、スクリーンの閉塞に至らない可能性が高くなる。

スクリーン開口部の大きさは、ECCサンプを水源とする系統の物理的制約に依存する。目の細かいデブリスクリーンのメッシュサイズは、格納容器スプレーノズルの口径、炉心燃料集合体内での冷却材チャンネル面積、シールやベアリング等のポンプ設計特性などの因子を考慮して決定する。

上述したように、ポンプ性能の低下は、プラント設計や配置など多くの要因によって発生し得るが、特に、除去装置やサンプ出口の配置に対するデブリ閉塞の影響及びLOCA後の水力的条件（例えば、空気侵入）は総合的に考慮しなくてはならない。本指針の付録Aに、PWRのサンプ設計におけるNPSH裕度を推定するための情報が示されているが、ここでは、空気の侵入量を2%以下としている。この場合、有効なNPSHが“要求”NPSHとその裕度の和より大きければ再設計の必要はない。しかし、空気の侵入量がこれより大きい場合には、再循環ラインの機器の設計を再度行う必要がある。

ラックやスクリーンの動作性及び構造上の健全性を確認するために、ECCサンプ構造及び出口の検査を行うための開口部を設ける必要がある。ラック、スクリーン、渦発生抑制装置及びサンプ出口の検査（目視検査を含む）は、燃料取替時ごとに定期的に行うものとする。燃料取替期間の後半にECCサンプ機器の検査を行うことにより、サンプ領域において作業残余等のゴミのないことを確認する。

沸騰水型原子炉(BWRs)

BWRでは、サブプレッションプールが長期再循環冷却の水源となり安全上重要な機器である。サブプレッションプールの特徴及び関連機器との関係をFigure 2に示す。サブプレッションプール及びECCポンプ吸込ストレーナの性能に関しては、空気侵入による影響、デブリによるストレーナの閉塞及びその両者によるポンプ動作性への影響（例えば、ポンプ入口での有効NPSHへの影響）を考慮する必要がある。

BWRの設計においては、ポンプ入口の保護及びNPSHの確保のために、デブリ除去装置（吸込ストレーナ）の使用を考慮することが望ましい。デブリ除去装置は、静的な吸込ストレーナ、動的な吸込ストレーナ、あるいは、動的なストレーナシステムのいずれかである。静的な吸込ストレーナは、多孔性表面上にデブリを集めることによりデブリがECCポンプ吸込配管に入るのを妨げるための装置である。その例が円錐台型多孔プレート式ストレーナである。動的な吸

込ストレーナや動的なストレーナシステムは、ある動作を行うことにより、デブリがECCポンプ吸込配管に入るのを防いだり、ポンプ上流で取り除いたり、あるいは、デブリの蓄積による悪影響を緩和するための装置である。こうした動的な緩和システムの例を付録Bに示す。

LOCAの多様性によりLOCA時の流体力学的現象（例えば、蒸気凝縮による振動、チャギング）の継続時間が異なるため、サブプレッションプール内でのデブリ移送解析では、LOCAの進展状況による影響を考慮する必要がある。LOCA時にサブプレッションプールに流入するデブリあるいは以前からプール内に存在していたデブリは、吸込ストレーナを閉塞させたり損傷させたりする可能性があり、圧力損失の影響について解析を行う必要がある。この解析では、蓄積されたデブリ層による粒子デブリのフィルター作用を考慮する必要がある。デブリ層による圧力損失特性は、デブリの種類と量、ストレーナ部での流速及びサブプレッションプール内での流体力学的現象に依存する。

C. 規制見解

1. 加圧水型原子炉 (PWRs)

非常用炉心冷却、格納容器熱除去及び格納容器雰囲気浄化の各種機能に対する水源として設計される原子炉建屋内サンプは、以下のガイドラインを満足するものとする。

- 1.1 サンプは、最低2つ設置し、各々、冗長性を有するECCS及びCSSの1系列に十分な容量を持つ。
- 1.2 冗長性のあるサンプは、隔壁を設けることにより互いに物理的に分離し、また、配管のホイップや水/蒸気の高流速ジェットによるサンプ機器（例えば、ラック、スクリーン、出口配管）の損傷を防ぐために高エネルギー配管からも物理的分離を図る。
- 1.3 サンプは、原子炉キャビティを除き、格納容器内の最も低い位置に設置する。サンプ出口は、(1)目の細かい内側デブリスクリン、及び、(2)目の粗い外側トラッシュラックの2種類のデブリ除去装置を垂直方向に設置することにより保護する。また、高密度のデブリが床上を移動してサンプに入り込むのを防ぐために、トラッシュラック上流にはデブリ堰を設ける。
- 1.4 ECCサンプ近傍の床は、サンプからの緩やかな下り勾配とする。
- 1.5 原子炉建屋内の上部区画からのドレンは全て、デブリを含む水が直接デブリ除去装置に当たることのないよう設計する。
- 1.6 トラッシュラックには十分な強度を持たせ、飛来物や大きなデブリからデブリ除去装置を保護する。デブリ除去装置は、飛来物による衝突荷重、デブリ蓄積による荷重、閉塞による差圧荷重に耐えられるよう設計する。
- 1.7 冷却材の設計流速を決める際に用いる除去装置表面積は、閉塞を考慮して保守的に求める。この際、除去装置の面積としては、設計基準水位以下にある部分だけを考慮する。さらに、繊維性断熱材デブリはデブリスクリン表面に一様に分布するものとし、閉塞は推定される損傷レベルに基づいて評価する。
- 1.8 (1)サンプの水力的性能（例えば、幾何形状の影響や空気の侵入）、(2)デブリによる影

響（例えば、デブリ移送、除去装置の閉塞や圧力損失）及び(3)ポンプ入口におけるNPSHへの上記2項目の影響に対する評価を行って長期再循環冷却が遂行できることを確認する。また、こうした評価によりポンプ入口におけるNPSH裕度を定める。長期再循環におけるポンプ性能の低下を防止するために、粒子の侵入や摩損の影響によるポンプシールやベアリングの破損可能性について設計評価を行う。

- 1.9 デブリ除去装置の頂部にはカバー板を設け、LOCA時のECC注入後に完全に水没するよう設計する。また、カバー板下部にトラップされた空気をベントできるよう設計する。
- 1.10 デブリ除去装置は、構造上の強度を維持し地震時の振動に耐えるよう設計する。
- 1.11 デブリスクリーンにおける開口部の大きさは、再循環機能を遂行する系統の制約に基づいて決定する。
- 1.12 サンプ出口は、空気の侵入や他の水力的影響（例えば、循環流パターンや取水口における圧力損失）によるポンプ性能の低下を防ぐよう設計する。
- 1.13 デブリ除去装置の材質は、休止期間及び運転期間における機能低下の防止を念頭において選定し、また、応力腐食等の悪影響を受けにくいものを採用する。
- 1.14 デブリ除去装置には、渦発生抑制装置やサンプ出口の検査を行うための開口部を設ける。
- 1.15 ECCサンプ機器（デブリ除去装置、渦発生抑制装置及びサンプ出口）の供用中検査として、(1)燃料取替時の検査と、(2)構造上の問題や腐食を確認するための目視検査を行う。

2. 沸騰水型原子炉(BWRs)

2.1 NPSH喪失の可能性を最小限に抑えるための設備

LOCA後の非常用炉心冷却機能や格納容器熱除去機能の水源となるサブプレッションプールには、長期冷却に対するアベイラビリティを担保するために以下の設備や機能を持たせるものとする。しかし、それらを全て装備することは要求されない。例えば、あるプラントでは、評価によって、下記の設備や機能の1つだけが必要であると判明する場合があります、また、ある設置者は、下記の設備や機能に限定されない場合もある。装備した設備や機能については、本指針の規制見解2.2に示される基準や仮定を用いて、その適性を評価するものとする。

2.1.1 静的ストレーナ

ECCポンプを有する系統の閉塞や機器の損傷を引き起こすようなデブリの侵入を防ぐために、ポンプ入口は、その上流に吸込ストレーナを設けることにより保護するものとする。静的ストレーナの設計や設置においては、以下の項目を考慮するものとする。

- 2.1.1.1 吸込ストレーナは、デブリ閉塞によるNPSH喪失を防いだり、あるいは、動的な機器を用いる場合には（規制見解2.1.4参照）NPSH喪失までの時間を最大限に遅らせるような設計（大きさ及び形状）のものを採用する。
- 2.1.1.2 サプレッションプール吸込ストレーナにおける開口部の大きさは、サブプレッションプールを水源とする系統の物理的制約に基づいて決定する。例えば、スプレーノズル隙間、炉心燃料集合体内での冷却材チャンネル開口部やポンプのシール、ベアリング、

翼駆動部隙間等の設計特性を考慮して、長期にわたるポンプ動作性を担保する。デブリの侵入や摩損の影響によるポンプ性能低下の可能性を検討するための評価を行い、長期再循環におけるポンプ性能低下の可能性を最小限に抑えるための機能を装備する。

- 2.1.1.3 ECCポンプ吸込口は、空気の侵入や他の水力的影響（例えば、循環流パターンや取水口圧力損失）によりポンプ性能が低下することのないよう設計する。
- 2.1.1.4 原子炉建屋内の上部区画からのドレンは全て、デブリを含む水が直接デブリ除去装置に当たることのないよう設計する。
- 2.1.1.5 吸込ストレーナには十分な強度を持たせ、飛来物や大きなデブリからデブリスクリーンを保護する。各々のデブリスクリーンは、飛来物による衝突荷重、デブリ蓄積による荷重、LOCA起因の流力荷重に耐えられるよう設計する。
- 2.1.1.6 吸込ストレーナは、構造上の強度を維持し地震時の振動に耐えるよう設計する。
- 2.1.1.7 吸込ストレーナの材質は、休止期間及び運転期間における機能低下の防止を念頭において選定する。

2.1.2 デブリの量の抑制

ECC吸込ストレーナの閉塞を引き起こし得るデブリの量（規制見解2.3.1参照）は、以下のいずれかの対策を講じることにより、最小限に抑えるものとする。

- 2.1.2.1 定期的にサブプレッションプールの清掃を行うための格納容器清掃プログラムを策定し、格納容器内の異物の管理、除去のためのプラント手順書を整備する。
- 2.1.2.2 ドライウェル内のダウンカムあるいはベント管近傍のデブリ除去装置は、サブプレッションプールへのデブリ移送を低減するのに効果的である。規制見解2.1.1を満足することに加えて、ドライウェルとウェットウェルとの間のデブリ除去装置により、格納容器の圧力抑制機能が低下することがないようにする。

2.1.3 計装設備

吸込ストレーナでのデブリ蓄積を防いだり、あるいは、それによる影響を緩和するために運転員の対応を必要とする場合には、ECCSポンプのNPSH喪失の兆候を表示し警報を発する計装設備を制御室に配備するものとする。

2.1.4 動的ストレーナ

吸込ストレーナでのデブリ蓄積を防いだり、あるいは、それによる影響を緩和するために、動的の機器あるいはシステム（付録B参照）を設けるものとする。動的なシステムは、ECCポンプシステムを閉塞させるデブリの流入を防ぐことができるものとする。なお、動的な機器あるいはシステムの作動により、他のECC機器やシステムの運転に悪影響を及ぼさないものとする。

2.1.5 供用中検査

供用中検査計画を確立し、その中で、(1)サブプレッションプール清掃状況を確認するための

燃料取替時検査、(2)吸込ストレーナ及びストレーナシステムの構造上の劣化や腐食を確認するための目視検査、及び、(3)吸込ストレーナの閉塞に寄与し得るデブリや残余物を同定し取り除くための格納容器内検査を行うものとする。

2.2 評価及び代替水源

上記の設備や機能が長期冷却を担保するのに適切であること、並びに、10CFR50.46(b)の5つの基準がLOCA後に満足されることを実証するために、規制見解2.3に示される基準及び仮定を用いて評価を行うものとする。吸込ストレーナでのデブリ蓄積を防いだり、あるいは、それによる影響を緩和するための対応を運転員に課す場合には、対応のための適切な表示、時間及びシステム性能が運転員に与えられることを確認するための評価を行うものとする。

上記の設備や機能に加えて、既存の系統及び代替水源を利用するための手順書を整備することも可能であり、これにより、長期の炉心冷却に多様性を持たせることことができる。なお、この手順を緊急時運転手順書に含める場合には、代替水源等の利用に必要な弁や配管をプラントの保守プログラムに含めるよう配慮するものとする。

2.3 長期再循環機能の評価

BWRにおけるデブリ閉塞の可能性を評価する際、Figures 3及び4に示す項目や事象を検討するものとする。規制見解2.1に示した設備や機能がLOCA後の長期再循環水源の確保に適切であることを確認するために、下記の技法、仮定及び基準を用いて、決定論的なプラント固有の評価を行うものとする。

2.3.1 デブリの生成及び発生源

2.3.1.1 10CFR50.46に従い、破断位置や口径等の異なる様々なLOCAに対してデブリの生成量を計算する。この際、最も厳しい条件となるLOCAが解析対象となっていることを確認する。

2.3.1.2 破断の影響を受ける領域の決定方法は、NUREG/CR-6224に記載されている。影響を受ける領域の体積を用いて、破断によって生成されるデブリの量を推定する。破断口から影響領域までの距離は、破断及びデブリに対する解析や実験によって裏付けられているものを用いる。破断時に発生する衝撃波及びその後のジェットを基に、デブリの生成量や影響領域内でのデブリ粒径とその分布を推定する。

2.3.1.3 防火材、断熱材あるいは運転中に存在するフィルターなど格納容器内の繊維性物質は全て同定する。

2.3.1.4 影響領域内での断熱材や塗装面、及び、繊維性、布製、プラスチック製あるいは粒子性物質は、デブリ源として考慮する。デブリの大きさの予測には解析モデルや実験を使用する。

2.3.1.5 少なくとも、下記の破断位置を考慮する。

- ・ 予想される影響領域においてデブリの量が最大となる主蒸気配管、給水配管及び再

循環配管の破断

- ・予想される影響領域において2種類以上のデブリが存在する大破断
- ・ドライウェルとウェットウェルとの間に直接経路を形成する領域での破断
- ・断熱材重量比に対して最も可能性の高い粒子デブリを伴う中破断及び大破断

- 2.3.1.6 吸込ストレーナの閉塞を引き起こすに十分なデブリの量と種類を推定する際には、プラント運転時における格納容器及びサブプレッションプールの清掃状態を考慮する。腐食生成物のような物質や異物（テープ、ワイヤ、紙、プラスチック等）が吸込ストレーナの圧力損失へ及ぼす影響の可能性も考慮する。
- 2.3.1.7 LOCA発生以前からプール内に存在する粒子の量としては、プール清掃以後に生成されたと推定される腐食生成物（スラッジ）の最大量を想定する。粒径分布及び粒子の量はプラントのサンプルに基づいて推定する。
- 2.3.2 デブリの移送
- 2.3.2.1 デブリは全てサブプレッションプールに移送されるものと仮定する。デブリ除去装置（規制見解2.1.2.2参照）がドライウェル内に設置されている場合、サブプレッションプールへ移送されるデブリがどれだけ減少するかを、実験的あるいは解析的に定量化する。
- 2.3.2.2 LOCA起因の現象（プールスウェル、チャギング、凝縮振動）により、LOCA発生時サブプレッションプール内に存在するデブリは全て浮遊したままであると仮定する。
- 2.3.2.3 サブプレッションプール内のデブリ濃度や量は、ドライウェルからサブプレッションプールに移動するデブリの量と、以前からサブプレッションプール内に存在すると推定されるデブリ及び異物の量を基に計算する。
- 2.3.2.4 サブプレッションプール内でのLOCA起因の擾乱が収まるまでデブリは沈降しないものと仮定する。デブリの沈降速度は、解析的あるいは実験的に立証する。
- 2.3.2.5 デブリの沈降を含む移動及び吸込ストレーナでの流速の計算に対しては、再循環モード運転、LOCA関連の流体力学的現象及びその他の流力荷重（例えば、局所的な乱流による影響やプール水の混合）によるサブプレッションプール水全体の流速を考慮する。
- 2.3.3 ストレーナの閉塞及び圧力損失
- 2.3.3.1 ストレーナの閉塞は、規制見解2.3.1に示す仮定及び基準を用いて推定したデブリの量と、ウェットウェルに移送されるデブリの量に基づく（規制見解2.3.2参照）。このデブリの体積と、LOCA発生以前からプール内に存在し得る他の物質とを用いて、ストレーナ表面でのデブリ蓄積速度を推定する。
- 2.3.3.2 ストレーナ表面へのデブリの蓄積速度の推定には、ストレーナでの流速及びサブプレッションプール内でのデブリ濃度を用いる。
- 2.3.3.3 サブプレッションプール吸込ストレーナの表面積を用いて接近流速を決め、また、閉

塞は保守的に評価する。解析的あるいは実験的に示されない限り、デブリは吸込ストレーナ表面に一様に分布すると仮定する。

- 2.3.3.4 ECCポンプに対するNPSHは、プラント許認可基準（例えば、規制指針1.1）に規定される条件を用いて決める。
- 2.3.3.5 デブリ閉塞による圧力損失は、ストレーナ設計（例えば、表面積や幾何形状）に基づく経験データ、デブリの種類や量及び粒径分布、接近速度から推定する。
- 2.3.3.6 デブリの種類や量に対する静的あるいは動的なストレーナの性能特性は、適切な試験データにより裏付けられるものとする。

D. 実施方法

この節の目的は、設置者や申請者が本指針を適用するための情報を示すことにある。

容認可能な代替方法がある場合を除き、申請者は、下記の評価において、本指針の方法を用いる。

1. 将来の建設許可を目的とし、1996年4月までに承認を得ていない標準設計の最終承認申請
2. 長期再循環水源のオペラビリティに影響を及ぼし得るプラント設計変更（例えば、潜在的なデブリ発生源の変更やストレーナ/サンプル設計の変更）
3. NRC発行のBulletin 96-03で要求された対策の設置者による実施

参考文献

1. NRC Bulletin 96-03, Potential Plugging of Emergency Core Cooling Suction Strainers by Debris in Boiling Water Reactors, USNRC, May 6, 1996.
2. NRC Bulletin No. 95-02, Unexpected Clogging of a Residual Heat Removal Pump Strainer While Operating in Suppression Pool Cooling Mode, USNRC, October 17, 1995.
3. NRC Bulletin No. 93-02, "Debris Plugging of Emergency Core Cooling Suction Strainers," USNRC, May 11, 1993.
4. NRC Bulletin No. 93-02, Supplement 1, "Debris Plugging of Emergency Core Cooling Suction Strainers," USNRC, February 18, 1994.
5. Generic Letter 85-22, "Potential for Loss of Post-LOCA Recirculation Capability due to Insulation Debris Blockage," USNRC, December 3, 1985.
6. A. W. Serkiz, "Containment Emergency Sump Performance (Technical Findings Related to Unresolved Safety Issue A-43)," NUREG-0897, Revision 1, USNRC, October 1985.
7. J. Wysocki and R. Kolbe, "Methodology for Evaluation of Insulation Debris Effects," NUREG/CR-2791 (SAND82-7067), USNRC, September 1982.
8. G. G. Weigand et al., "A Parametric Study of Containment Emergency Sump Performance," NUREG/CR-2758 (SAND82-0624), USNRC, July 1982.
9. M. S. Krein et al., "A Parametric Study of Containment Emergency Sump Performance: Results of Vertical Outlet Sump Tests," NUREG/CR-2759 (SAND82-7062), USNRC, October 1982.
10. M. Padmanabhan and G. E. Hecker, "Assessment of Scale Effects on Vortexing, Swirl, and Inlet Losses in Large Scale Sump Models," NUREG/CR-2760 (ARL-48-82), USNRC, June 1982.
11. M. Padmanabhan, "Results of Vortex Suppressor Tests, Single Outlet Sump Tests, and Miscellaneous Sensitivity Tests," NUREG/CR-2761 (SAND82-7065), USNRC, September

- 1982.
12. M. Padmanabhan, "Hydraulic Performance of Pump Suction Inlets for Emergency Core Cooling Systems in Boiling Water Reactors," NUREG/ CR-2772 (ARL-398A), USNRC, June 1982.
 13. P.S. Kammath, T.J. Tantillo, W.L. Swift, "An Assessment of Residual Heat Removal and Containment Spray Pump Performance Under Air and Debris Ingesting Conditions," NUREG/ CR-2792 (CREARE TM-825), USNRC, September 1982.
 14. D. N. Brocard, "Buoyancy, Transport, and Head Loss of Fibrous Reactor Insulation," NUREG/ CR-2982 (SAND82-7205), Revision 1, USNRC, July 1983.
 15. W. W. Durgin and J. Noreika, "The Susceptibility of Fibrous Insulation Pillows to Debris Formation Under Exposure to Energetic Jet Flows," NUREG/CR-3170 (SAND83-7008), USNRC, March 1983.
 16. J. J. Wysocki, "Probabilistic Assessment of Recirculation Sump Blockage Due to Loss-of-Coolant Accidents," NUREG/CR-3394, Volumes 1 and 2 (SAND83-7116), USNRC, July 1983.
 17. D. N. Brocard, "Transport and Screen Blockage Characteristics of Reflective Metallic Insulation Materials," NUREG/CR-3616 (SAND83-7471), USNRC, January 1984.
 18. G. Zigler et al., "Parametric Study of the Potential for BWR ECCS Strainer Blockage Due to LOCA Generated Debris," NUREG/CR-6224 (SEA No. 93-554-06-A:1), USNRC, October 1995.
 19. NRC Information Notice 95-47, Unexpected Opening of a Safety/Relief Valve and Complications Involving Suppression Pool Cooling Strainer Blockage, USNRC, October 4, 1995.
 20. NRC Information Notice 95-06, Potential Blockage of Safety-Related Strainers by Material Brought Inside Containment, USNRC, January 25, 1995.
 21. NRC Information Notice 94-57, Debris in Containment and the Residual Heat Removal System, USNRC, August 12, 1994.
 22. Regulatory Guide 1.1, Net Positive Suction Head for Emergency Core Cooling and Containment Heat Removal System Pumps, USNRC, November 2, 1970.

付録A 非常用炉心冷却水源のレビューガイドライン

長期再循環のための水源の適性を判断するために、LOCA後の可能な状況の下で水源の評価を行うものとする。技術評価は、(1) サンプの水力的性能、(2) LOCA起因デブリの影響、及び、(3) 悪条件下でのポンプ性能に分類できる。これらの分類において特に考慮すべき事項及びそれらの関係をFigure A-1に示す。LOCA後の想定される全ての状態下においてポンプ入口で適切なNPSH裕度が存在することを確認することが最終的な基準である。

サンプの水力的性能

サンプの水力的性能（空気侵入の可能性に関連）は、水没の程度（PWRサンプあるいはBWR吸込ストレーナの出口から水面までの高さ）と要求されるポンプ性能（ポンプ入口での流速）を基に評価される。広範な実験の結果から、ECCポンプの水力的性能（特に、空気侵入の可能性）はFroude数の関数であることが分かっている。Froude数は、配管口径中央から水面までの高さ s と入口配管での流速 U で表される。

$$\text{Froude数} = \frac{U}{\sqrt{gs}}$$

ここで、 g は重力加速度を示す。

サンプの水力的性能は以下の3つのカテゴリに分類される。

1. 空気侵入ゼロ：この場合、渦発生抑制装置は必要なく、また、“要求”NPSHについても、製造元のポンプ曲線から得られる値以上の増加は要求されない。
2. 2%以下の空気侵入：この場合は保守的なレベルであり、“要求”NPSHが増加するため、ポンプ性能は低下しないと予想される。
3. 渦発生抑制装置の使用：空気侵入による影響をゼロにするために渦発生抑制装置を使用する。

PWRに対して、空気侵入ゼロは、Table A-1の設計ガイドラインを用いることで担保される。2%以下の空気侵入がある設計に関する判断は、Table A-2の相関式とサンプの幾何学的包絡性を用いて行う。幾何学的ガイドライン及びスクリーンのガイドラインはTable A-3.1、A-3.2、A-4及びA-5に示されている。Table A-6は、空気侵入をゼロに低減する能力を示した渦発生抑制装置の設計ガイドラインである。これらのガイドライン（Table A-1～A-6）は、実規模のサンプについて行われた広範な水力的試験から策定されたものであり、サンプの水力的性能を迅速に評価する方法を示している。サンプ設計が設計境界条件から著しく逸脱している場合には、サンプの水力的性能が適切であることを確認するために類似の性能データを入手するものとする。

BWRに対しては、サブプレッションプール吸込ストレーナの出口設計に関する実規模試験により、最小水没6フィートでFroude数が0.8未満であれば空気侵入がゼロになることが明らかとなっている。また、同じ水没条件でFroude数が1.0以下であれば、空気侵入が2%になるまでポンプの運転が可能であることも分かっている。（参考文献A-1及びA-2）

LOCA起因デブリの影響

LOCAによるデブリの生成に関する評価及びデブリ除去装置の閉塞に関する評価は、使用されている断熱材の種類と量、断熱材の設置場所に依存し、また、サンプルやサブレーションプール内ストレーナの設置位置、配管破断時のデブリ生成量及び除去装置へのデブリの移送にも関連する。従って、閉塞の推定 (生成、移送及び圧力損失) は断熱材物質、配管の配置及びプラント設計に特有のものとなる。

破断時のジェット荷重がデブリ生成の支配的要因であるため、予測されるジェットの包絡線(面)により断熱材デブリの種類と量が決まる。Figure A-2は、参考文献A-1及びA-3の解析的及び実験的検討の結果を基に作成された3次元モデルである。破断時のジェット荷重による損傷 (例えば、生成された断熱材デブリ及び他のデブリの体積、デブリの大きさ) は、断熱材の種類、設置の方法及び破断箇所からの距離によりかなり異なる。Region Iは全て損傷する領域、Region IIはかなり損傷するが損傷の程度は断熱材の種類や被覆材の有無、取付方法等に依存する領域、Region IIIは断熱材全体が脱落したり形状を維持したままの状態ではセグメント化する領域を表している。

悪条件下でのポンプ性能

ポンプ製造業界は、ポンプ性能の低下度合(百分率)を基準にして、ポンプの“要求”NPSHを定めてきた。低下度合は、一般には1%から3%の範囲である。許容される空気侵入に関しては2%限界値が推奨されているが、これは、ポンプの性能低下がこの値より高いレベルで発生することが示されてきたことによる。

しかし、2%未満の空気侵入も“要求”NPSHに影響を及ぼし得る。空気侵入が認められた場合には、以下の関係式を基に、ポンプ曲線から“要求”NPSHを修正することが必要となる。

$$NPSH_{required(\alpha_p < 2\%)} = NPSH_{required(liquid)} \cdot \beta$$

ここで、 $\beta = 1 + 0.50\alpha_p$ であり、 α_p はポンプ入口部での空気侵入率(体積百分率)である。

組合せによる影響

Figure A-1に示すように、3つの相互独立の影響(サンプルあるいは吸込ストレーナの性能、デブリの生成及び移送、及び、悪条件下でのポンプの運転)については、長期再循環能力(NPSH裕度の喪失)を確認するために評価する必要がある。

参考文献

- A-1 A. W. Serkiz, "Containment Emergency Sump Performance (Technical Findings Related to Unresolved Safety Issue A-43)," NUREG-0897, Revision 1, USNRC, October 1985.
- A-2 M. Padmanabhan, "Hydraulic Performance of Pump Suction Inlets for Emergency Core Cooling Systems in Boiling Water Reactors," NUREG/CR-2772 (ARL-398A), USNRC, June 1982.
- A-3 G. Zigler et al., "Parametric Study of the Potential for BWR ECCS Strainer Blockage Due to

- LOCA Generated Debris," NUREG/CR-6224 (SEA No. 93-554-06-A:1), USNRC, October 1995.
- A-4 D. N. Brocard, "Buoyancy, Transport, and Head Loss of Fibrous Reactor Insulation," NUREG/CR-2982 (SAND82-7205), Revision 1, USNRC, July 1983.
- A-5 W. W. Durgin and J. Noreika, "The Susceptibility of Fibrous Insulation Pillows to Debris Formation Under Exposure to Energetic Jet Flows," NUREG/CR-3170 (SAND83-7008), USNRC, March 1983.
- A-6 J. J. Wysocki, "Probabilistic Assessment of Recirculation Sump Blockage Due to Loss-of-Coolant Accidents," NUREG/CR-3394, Volumes 1 and 2 (SAND83-7116), USNRC, July 1983.
- A-7 D. N. Brocard, "Transport and Screen Blockage Characteristics of Reflective Metallic Insulation Materials," NUREG/CR-3616 (SAND83-7471), USNRC, January 1984.
- A-8 G. G. Weigand et al., "A Parametric Study of Containment Emergency Sump Performance," NUREG/CR-2758 (SAND82-0624), USNRC, July 1982.
- A-9 M. S. Krein et al., "A Parametric Study of Containment Emergency Sump Performance: Results of Vertical Outlet Sump Tests," NUREG/CR-2759 (SAND82-7062), USNRC, October 1982.
- A-10 M. Padmanabhan and G. E. Hecker, "Assessment of Scale Effects on Vortexing, Swirl, and Inlet Losses in Large Scale Sump Models," NUREG/CR-2760 (SAND82-7063), USNRC, June 1982.

付録B 動的緩和系の例

配管内ストレーナ

設備の上流の配管内に設置し、逆洗（バックフラッシュ）により流体中の異物や粒子を取り除く。

自洗式ストレーナ

設備の上流の配管内に設置し、流体中の異物や粒子の付着したフィルターを外部からの支援無しで洗浄する。

ストレーナ逆洗システム

ストレーナ部での流体の流れと逆方向の強制流をかけてストレーナ表面から異物や粒子を洗い落とす。

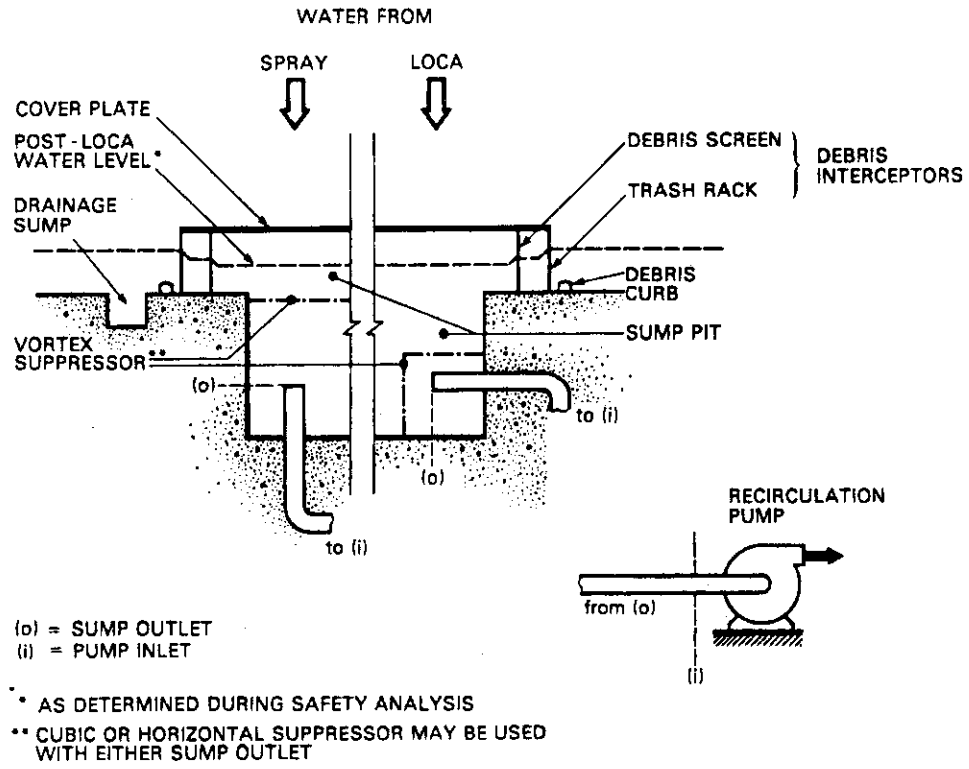


Figure 1. PWR

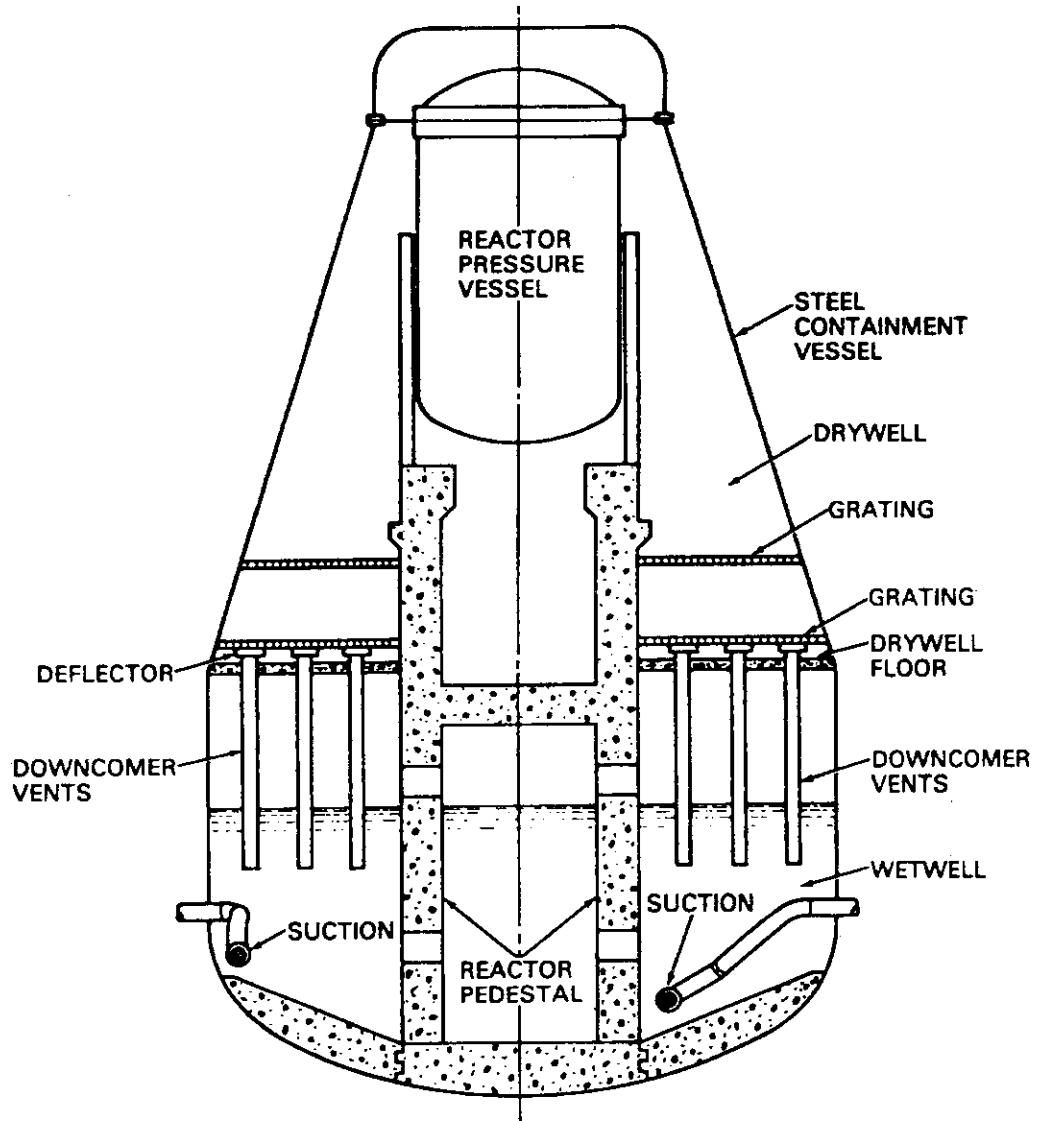


Figure 2. BWR with a Mark II Containment

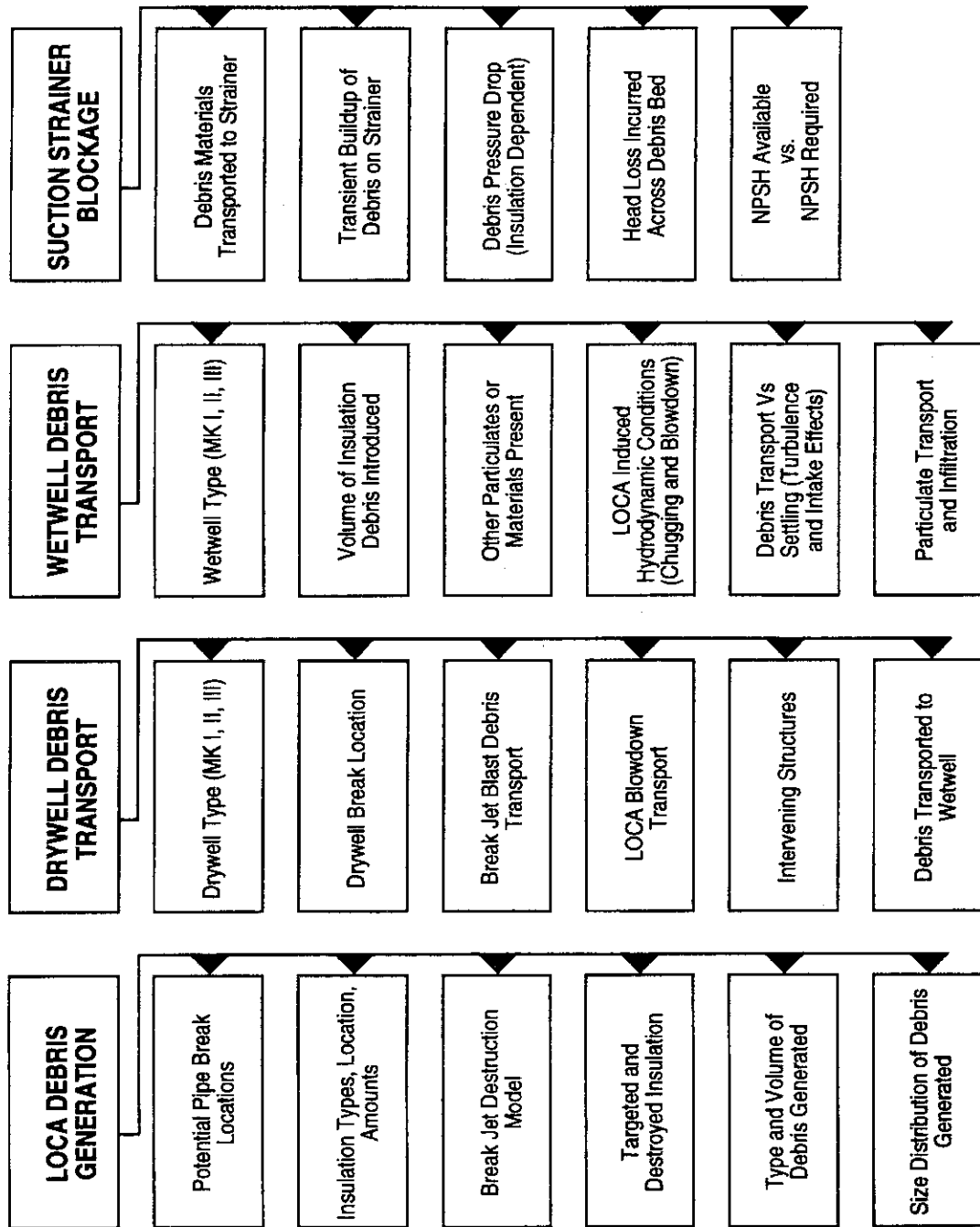


Figure 3. Debris Blockage Considerations

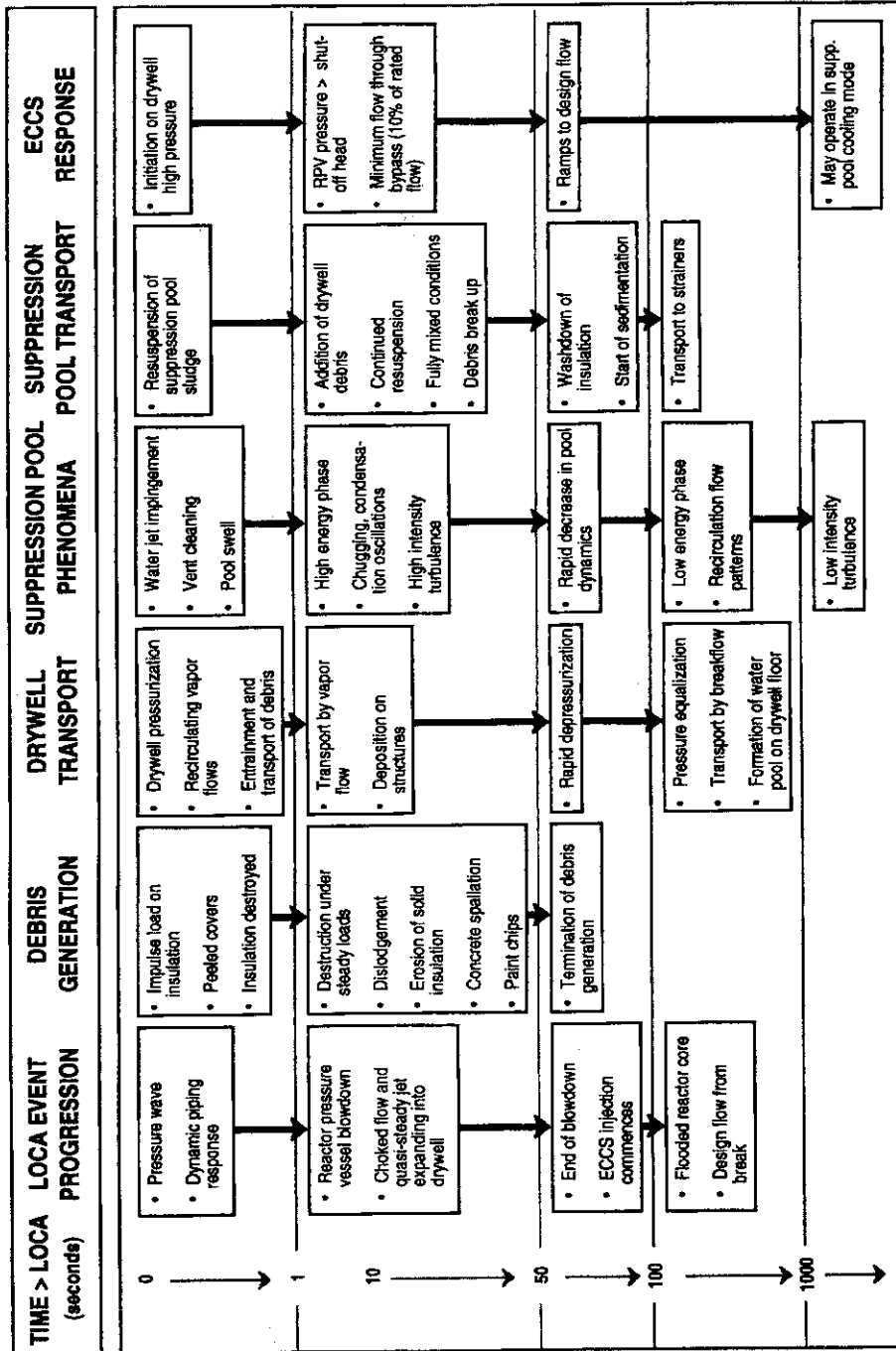


Figure 4. Events that May Effect Debris Blockage

TABLE A-1
PWR HYDRAULIC DESIGN GUIDELINES FOR ZERO AIR INGESTION

Item	Horizontal Outlets	Vertical Outlets
Minimum Submergence, s	(ft)	9
	(m)	2.7
Maximum Froude Number, Fr	0.25	0.25
Maximum Pipe Velocity, U	(ft/s)	4
	(m/s)	1.2

NOTE: These guidelines were established using experimental results from References A-8, A-9, and A-10 and are based on sumps having a right rectangular shape.

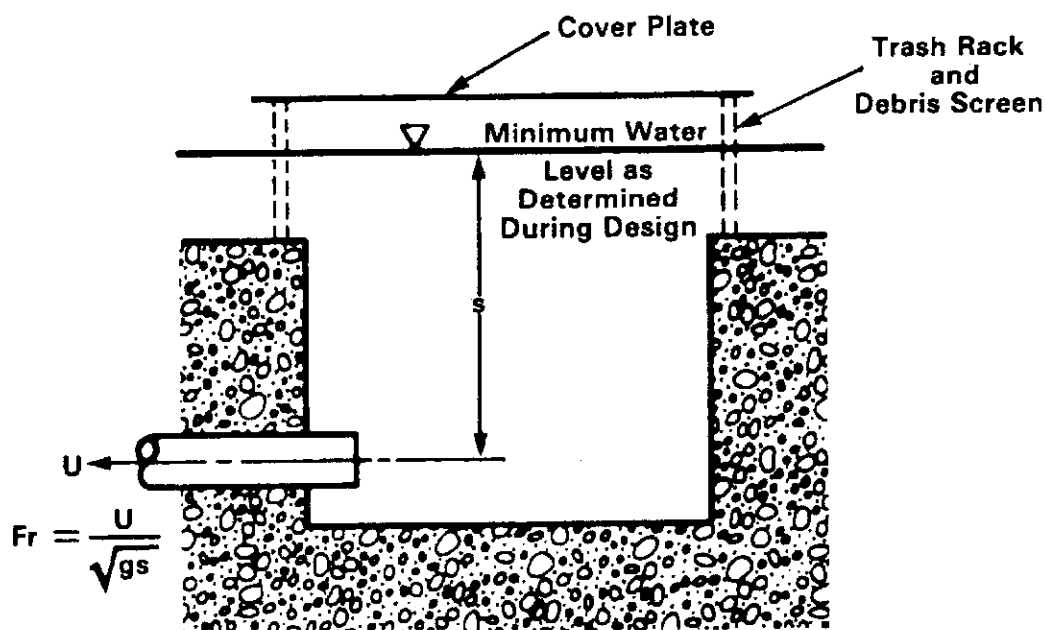


TABLE A-2
PWR HYDRAULIC DESIGN GUIDELINES FOR AIR INGESTION <2%

Air ingestion (α) is empirically calculated as

$$\alpha = \alpha_0 + (\alpha_1 \times Fr)$$
 where α_0 and α_1 are coefficients derived from test results as given in the table below

Item	Horizontal Outlets		Vertical Outlets		
	Dual	Single	Dual	Single	
Coefficient α_0	-2.47	-4.75	-4.75	-9.14	
Coefficient α_1	9.38	18.04	18.69	35.95	
Minimum Submergence, s	(ft)	7.5	8.0	7.5	10.0
	(m)	2.3	2.4	2.3	3.1
Maximum Froude Number, Fr	0.5	0.4	0.4	0.3	
Maximum Pipe Velocity, U	(ft/s)	7.0	6.5	6.0	5.5
	(m/s)	2.1	2.0	1.8	1.7
Maximum Screen Face Velocity (blocked and minimum submergence)	(ft/s)	3.0	3.0	3.0	3.0
	(m/s)	0.9	0.9	0.9	0.9
Maximum Approach Flow Velocity	(ft/s)	0.36	0.36	0.36	0.36
	(m/s)	0.11	0.11	0.11	0.11
Maximum Sump Outlet Coefficient, C_L	1.2	1.2	1.2	1.2	

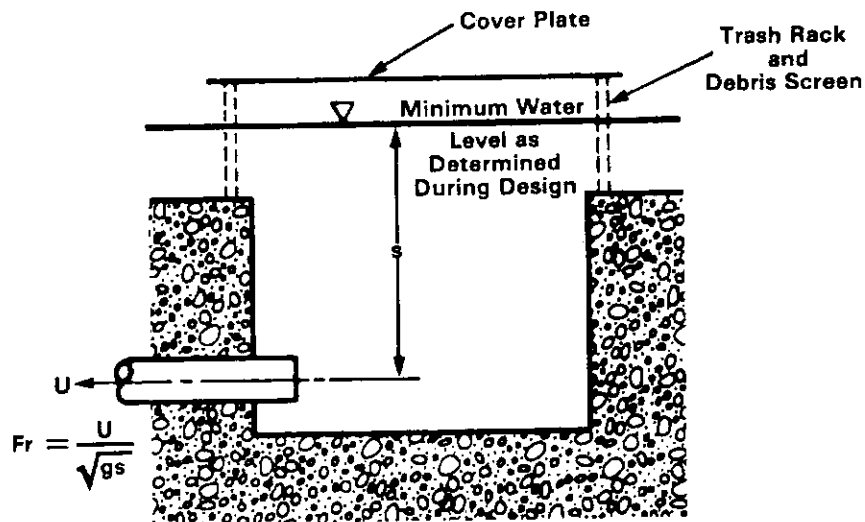


TABLE A-3.1

**PWR GEOMETRIC DESIGN ENVELOPE GUIDELINES FOR HORIZONTAL SUCTION
OUTLETS**

Sump Outlet	Size		Sump Outlet Position*						Screen	
	Aspect Ratio	Min. Perimeter (ft) (m)	e_y/d	$(B-e_y)/d$	c/d	b/d	f/d	e_x/d	Min. Area (ft ²) (m ²)	
Dual	1 to 5	36 11	>1	>3	>1.5	>1	>4	>1.5	75 7	
Single	1 to 5	16 4.9					-		35 3.3	

NOTE: Dimensions are always measured to pipe centerline.

* Preferred location.

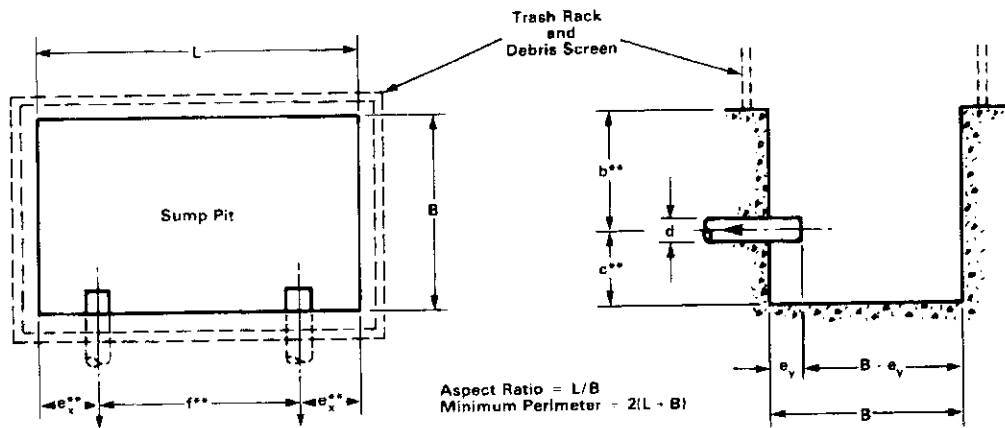


TABLE A-3.2

**PWR GEOMETRIC DESIGN ENVELOPE GUIDELINES FOR VERTICAL SUCTION
OUTLETS**

Sump Outlet	Size		Sump Outlet Position*						Screen	
	Aspect Ratio	Min. Perimeter (ft) (m)	e_y/d	$(B-e_y)/d$	c/d	b/d	f/d	e_x/d	Min. Area (ft ²) (m ²)	
Dual	1 to 5	36 11	>1	>1	>0	>1	>4	>1.5	75 7	
Single	1 to 5	16 4.9			<1.5		-		35 3.3	

NOTE: Dimensions are always measured to pipe centerline.

* Preferred location.

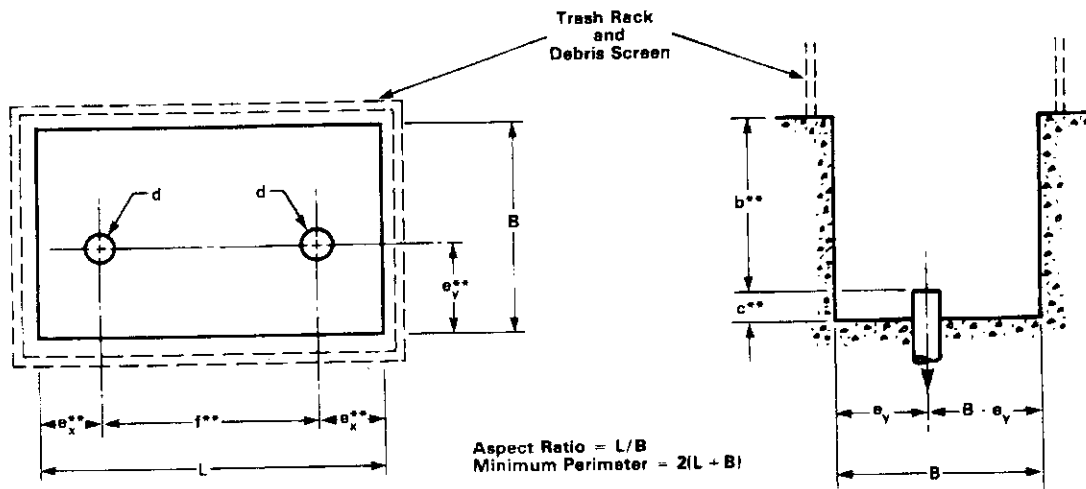


TABLE A-4

ADDITIONAL GUIDELINES RELATED TO SUMP SIZE AND PLACEMENT

1. The clearance between the trash rack and any wall or obstruction of length l equal to or greater than the length of the adjacent screen/grate (B_s or L_s) should be at least 4 feet (1.2 meters).
2. A solid wall or large obstruction may form the boundary of the sump on one side only, i.e., the sump must have three sides open to the approach flow.
3. These additional guidelines should be followed to ensure the validity of the data in Tables A-1, A-2, A-3.1, and A-3.2.

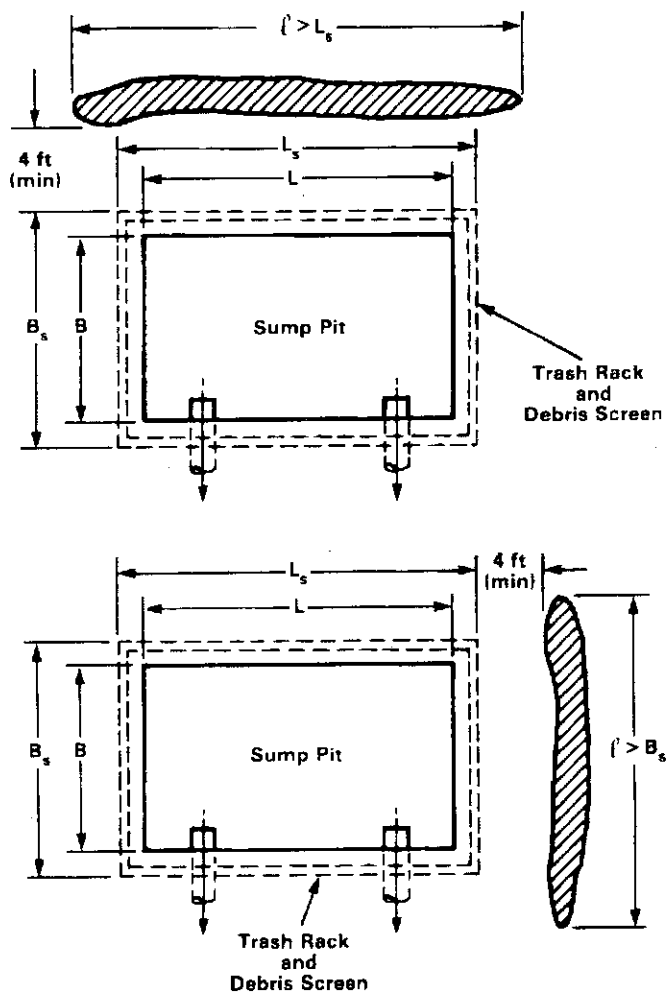


TABLE A-5
PWR DESIGN GUIDELINES FOR INTERCEPTORS AND COVER PLATE

1. Screen area should be obtained from Tables A-3.1 and A-3.2.
2. Minimum height of interceptors should be 2 feet (0.61 meter).
3. Distance from sump side to screens, g_s , may be any reasonable value.
4. Screen mesh should be $\frac{1}{4}$ inch (6.4 mm) or finer.
5. Trash racks should be vertically oriented 1- to 1½-inch (25- to 38-mm) standard floor grate or equivalent.
6. The distance between the debris screens and trash racks should be 6 inches (15.2 cm) or less.
7. A solid cover plate should be mounted above the sump and should fully cover the trash rack. The cover plate should be designed to ensure the release of air trapped below the plate (a plate located below the minimum water level is preferable).

NOTE: See Reference A-1.

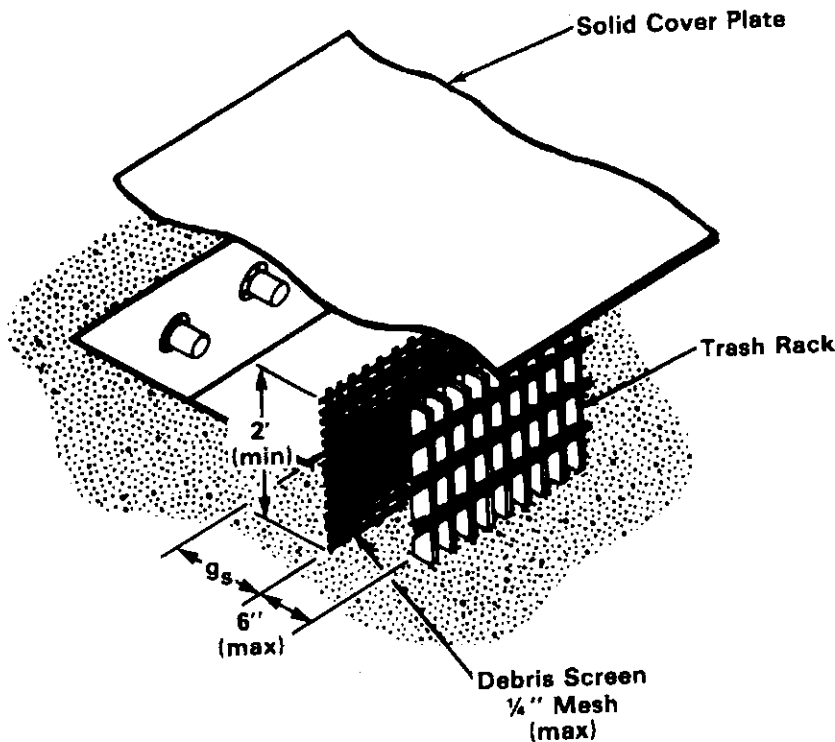
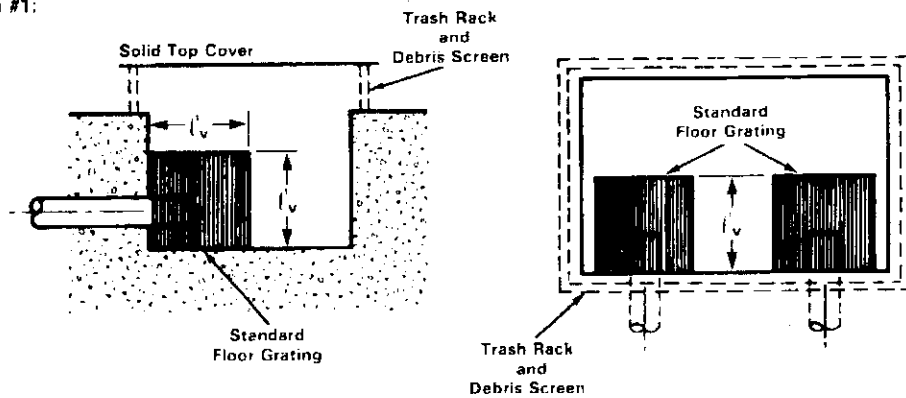


TABLE A-6
PWR GUIDELINES FOR SELECTED VORTEX SUPPRESSORS

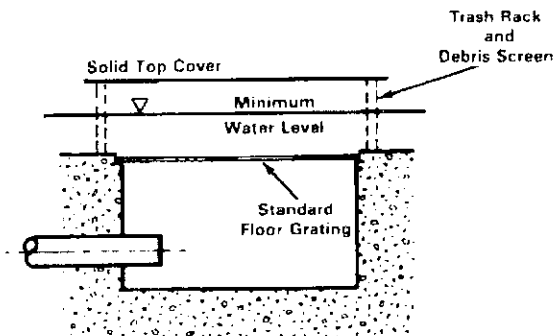
1. Cubic arrangement of standard 1½-inch (30-mm) deep or deeper floor grating (or its equivalent) with a characteristic length, l_v , that is at least 3 pipe diameters and with the top of the cube submerged at least 6 inches (15.2 cm) below the minimum water level. Noncubic designs with $l_v > 3$ pipe diameters for the horizontal upper grate and satisfying the depth and distances to the minimum water level given for cubic designs are acceptable.
2. Standard 1½-inch (38-mm) or deeper floor grating (or its equivalent) located horizontally over the entire sump and containment floor inside the screens and located below the lip of the sump pit.

NOTE: Tests on these types of vortex suppressors at Alden Research Laboratory have demonstrated their capability to reduce air ingestion to zero even under the most adverse conditions simulated.

Design #1:



Design #2:



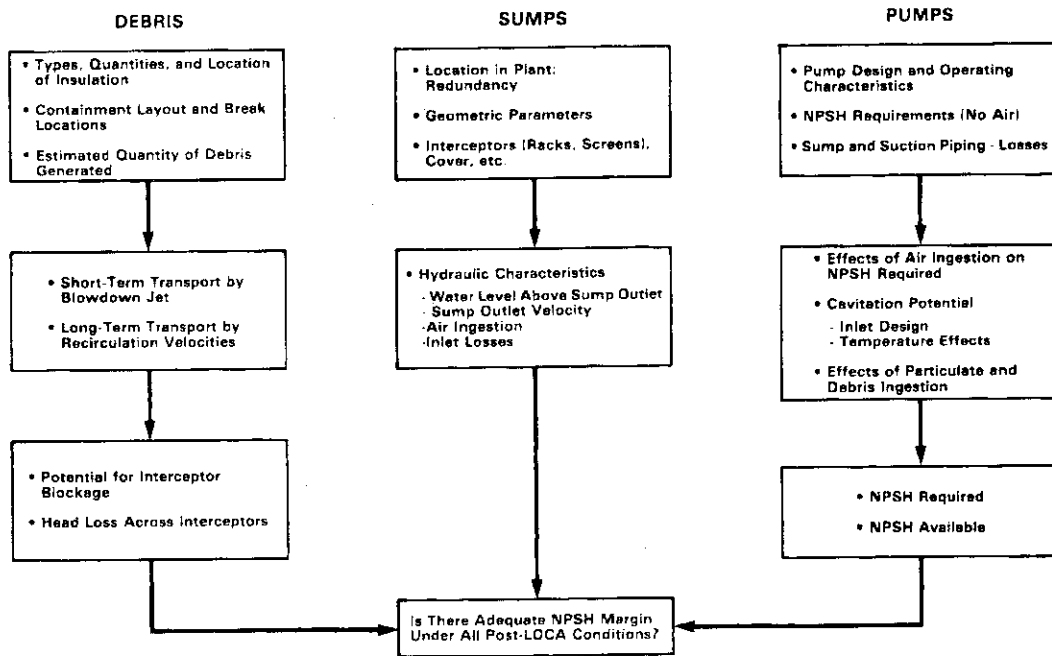


Figure A-1 Technical Considerations Relevant to PWR ECC Sump Performance

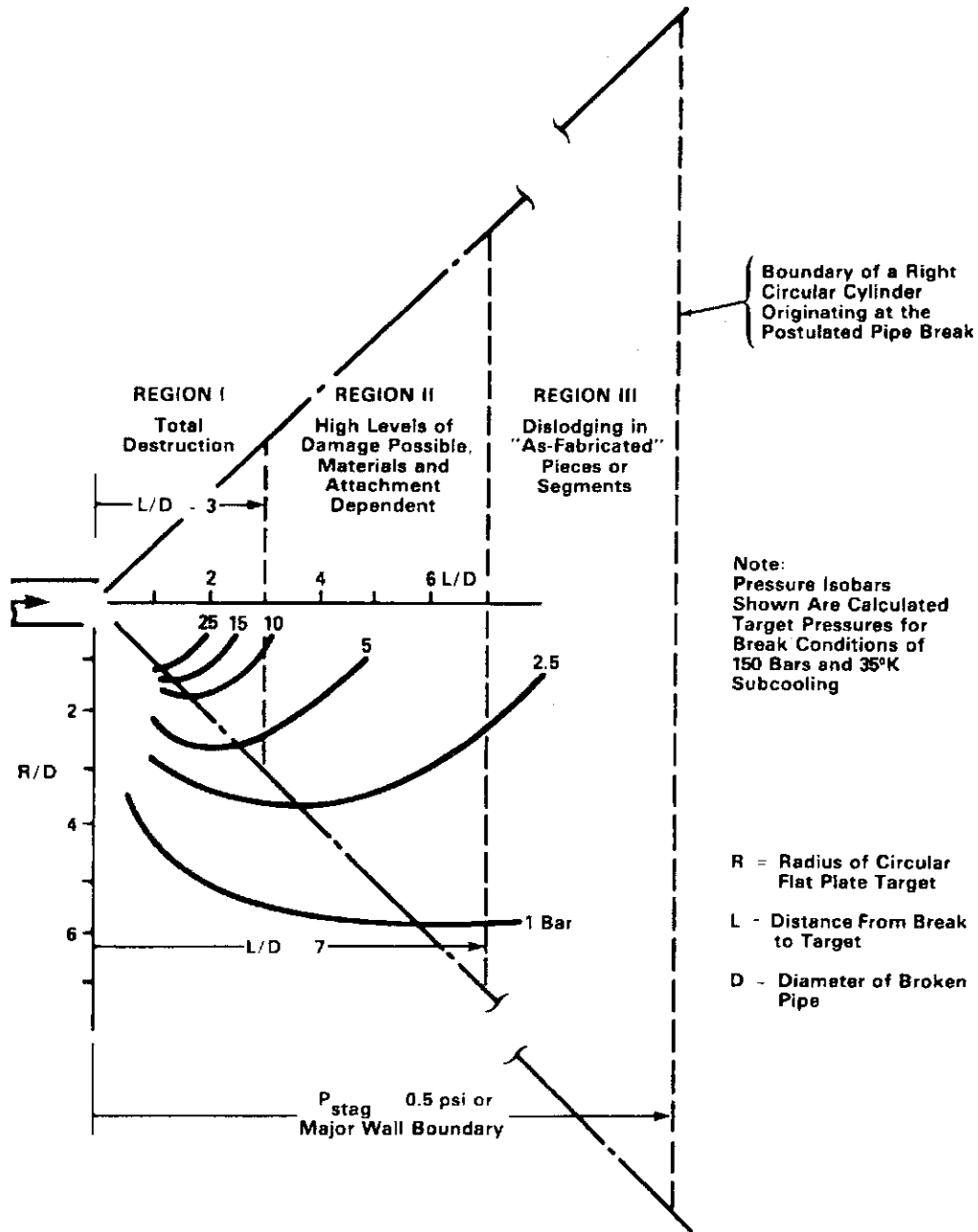


Figure A-2. Multiple Region Insulation Debris Model for PWRs

付録Ⅲ NUREG/CR-6224、“BWRにおけるLOCA起因のデブリによる ECCSストレーナ閉塞可能性に関するパラメータ評価”の概要

1996年5月に米国原子力規制委員会が発行したBulletin 96-03及び規制指針RG-1.82改訂第2版において、NUREG/CR-6224、「BWRにおけるLOCA起因のデブリによるECCSストレーナ閉塞可能性に関するパラメータ評価」が参照されている。付録Ⅲでは、同報告書の概要を紹介する。

1.0 経緯と目的

1.1 経緯

1979年、米国原子力規制委員会(NRC)は、LOCA後の再循環冷却機能に関して、未解決安全問題(USI)A-43、「格納容器非常用サンプ性能」を設定した。この問題に対して、NRCは、1985年12月3日にGeneric Letter 85-22を発行し、設置者にその解決策を示した。この時点で、NRCは、新たな規制要求を課する必要性はないと判断したが、規制指針(RG)-1.82を改訂し、それをガイドラインとして使用するよう勧告した。

1992年7月28日、スウェーデンのBWR、Barsebaeck-2において、安全弁の誤開により鉍物綿性の断熱材が脱落しECCSストレーナが閉塞するという事象が発生した。この事象の重要性に鑑み、スウェーデンをはじめ欧州諸国の規制当局は、実験的及び解析的研究を開始した。実験結果と、USI A-43の解決策を得るために得られた結果(NUREG/CR-2982改訂版)とを比較し、従来法ではデブリによる圧力損失を過小評価していたことが明らかとなった。また、Barsebaeck-2の事象では、NUREG-897改訂版におけるモデル及びデータで推定される量よりも多くのデブリが吸込ストレーナに到達していた。

一方、米国内でも、運転中に蓄積されたデブリや誤ってサブプレッションプール内に落としたフィルター材等によるECCSポンプストレーナの閉塞事象が発生しており、これまでに評価されていなかった”フィルター作用”現象による閉塞の可能性が示された。そこで、NRCは、1993年5月11日に、Bulletin 93-02を発行し、デブリ発生源の同定とその除去対策を行うよう要求した。さらに、MARK-I型格納容器のBWR-4を対象に、詳細なプラント固有の評価を行うこととした。

1.2 目的

本研究の目的は、USI A-43の解決策を得るために行われたPWRプラントの評価と同等のレベルでBWRプラントの評価を行うことにある。本研究では、決定論的方法と確率論的方法を用いてストレーナ閉塞によるECCSポンプの有効吸込水頭圧(NPSH)喪失の可能性を評価した。決定論的評価では、配管破断によりECCSストレーナの閉塞及びNPSHの喪失が起こるか否かを検討することに主眼を置いた。確率論的評価では、ECCSストレーナ閉塞とそれによる炉心損傷の可能性を検討することに焦点を当てた。

2.0 断熱材デブリの影響解析の方法

2.1 概要

本研究では、決定論的方法と確率論的方法を用いて、BWRにおけるECCSストレーナ閉塞の可能性を評価している。まず、決定論的評価では、次の5つの解析/評価を行う。

- (1) 評価対象のBWRプラントの選定：配管破断位置及びその周辺配管の同定
 - (2) デブリ生成モデル(DGM)の作成：生成される断熱材デブリの種類と体積の評価
 - (3) ドライウェル内移送モデルの作成：サブプレッションプールへ移送されるデブリ量の評価
 - (4) トランジェント抑制モデルの作成：サブプレッションプール内でのデブリ移送の解析
(デブリの沈降や付着、スラッジ等の移動を解析)
 - (5) 圧力損失モデルの作成：デブリの付着によるストレーナ部での圧力損失の評価
- 次に、確率論的評価では、以下の2つの評価を行う。

- (1) 配管破断の発生頻度評価：原子炉冷却系配管及び主蒸気配管における溶接部を対象
- (2) 機能イベントツリーの作成：大LOCAを対象とし炉心損傷事故の発生頻度を評価

2.2 対象プラントの選定

GE社製のMark-I格納容器型BWR-4を選定しているが、これは、MARK-IIやIIIに比べてサブプレッションプールが小さくストレーナ部での流速が速いことが主な理由である。原子炉冷却系配管の99%以上は鋼製被覆の繊維性断熱材が取り付けられている。

2.3 配管破断の発生頻度に関する検討

プラントのレイアウトをレビューし、通常運転時に高圧状態に曝される配管溶接部を同定した。その結果、デブリの生成は、給水配管、再循環配管及び主蒸気配管における破断に支配されると結論づけられた。配管破断の発生頻度は、NUREG/CR-4792の方法を用いて評価する。

2.4 デブリの生成に関する検討

LOCA後の断熱材デブリの生成は、破断流ジェットの拡がりや衝撃力に支配される。断熱材の損傷や脱落する領域を定義するために、NUREG-0869改訂版及びNUREG-0897改訂版に示される「3領域二相ジェット流拡大モデル(three-region, two-phase conical jet expansion model)」を変更して使用した。主な変更点は以下の通りである。

- (1) 破断ジェット流領域の縮小 (BWRの通常運転時圧力がPWRより低いため)
- (2) 球形のジェット流拡大モデルの採用 (Battele-Columbusの実験により裏付けされている：
PWRでは円錐形を仮定)

また、影響を受ける領域は、破断位置から配管口径の7倍までの距離($7L/D$ 、 L は破断位置からの距離、 D は破断口径)と仮定した。

2.5 デブリ移送に関する検討

Barsebaeck-2の事象では、ドライウェルに存在したデブリの約50%がサブプレッションプールに流入したと報告されているが、それより多いか少ないかは、格納容器の形式、破断位置及びデブリの種類と大きさに依存する。本研究では、ドライウェルからサブプレッションプールへのデブリの移送は、ブローダウン・フェーズ(LOCA時のジェット流による移送)とウォッシュダウン・フェーズ(格納容器スプレー水等による移送)において起こるものと仮定した。前者では、ドライウェル内の高さ位置に応じて、0.25、0.5、0.75という移送割合係数を用い、後者では、ドライウェル内に滞留しているデブリの25%が移送されると仮定した。また、サブプレ

シヨンプール内のスラッジ等もストレーナに移送されるものとした。

2.6 ストレーナ閉塞に関する検討

繊維性デブリがストレーナ表面に付着することにより、圧力損失が生じNPSH裕度の喪失に至る可能性がある。本研究では、(1)デブリのストレーナ表面での付着形態（一様分布か否か）、(2)断熱材の種類、及び、(3)スラッジ等の粒子型デブリを考慮して、デブリ蓄積と圧力損失のモデルを作成し、閉塞の程度を評価した。

2.7 ポンプ性能に関する検討

NUREG-0897改訂版と同様の方法を用いて、悪条件下における残留熱除去系(RHR)と炉心スプレー系(CS)のポンプ性能を解析した。ストレーナ閉塞による圧力損失がNPSH裕度を越えた場合にはECCSの機能が喪失すると仮定したが、ブローダウン時のサブプレッションプールの加圧やプール水温上昇によるNPSHの低下は考慮していない。

2.8 炉心損傷発生頻度に関する検討

炉心損傷の発生頻度(CDF)に対するストレーナ閉塞の寄与を評価するにあたっては、イベントツリーを作成したが、そこでは、(1)LOCAの発生頻度、(2)ストレーナ閉塞の発生確率、(3)運転員によるストレーナ閉塞の認識、(4)バックフラッシュ機能の利用、(5)代替の炉心冷却手段、(6)格納容器健全性の維持、(7)運転員による事象緩和策の時間余裕、(8)運転員による復旧操作、等を考慮した。

2.9 Blockage 2.0コードの概要

このコードは、デブリの生成及び移送、デブリによるストレーナ部での圧力損失、及び、NPSHへの影響を計算する。コードへの入力データは、(1)破断する溶接の位置と大きさ、(2)破断の発生頻度、(3)影響を受ける配管の数、直径、長さ、(4)断熱材の種類と厚み、及び、(5)デブリの粒径分布、粒子型デブリの種類と存在量、沈降速度、サブプレッションプールやECCSの設計情報、等である。

3.0 対象プラントのデータ

3.1 はじめに

プラントデータは、(a)プラントへの訪問及びシステム技師との討議、(b)配管計装線図、(c)個々の系統の等測図、(d)NUKON断熱材の取付図、(e)サブプレッションプール貫通部図面、及び、(f)プラント技師による計算結果から得た。

3.2 配管レイアウト

ドライウェル内の配管としては、(a)再循環配管、(b)主蒸気配管、(c)給水配管、(d)RHR配管、(e)高圧注入系配管、(f)CS配管、(g)原子炉隔離時冷却系(RCIC)配管、(h)原子炉水浄化系(RWCU)配管、(i)逃し安全弁(SRV)ドレン配管、等がある。

3.3 原子炉冷却系配管溶接部位置

2インチ口径以上の配管に対して、約400個の溶接部が同定されたが、その大部分は、再循環配管、給水配管及び主蒸気配管に存在する。

3.4 ドライウェル内配管の断熱材

RCIC配管、RWCU配管、SRVドレン配管及び再循環ドレン配管以外の配管には、NUKON断熱材が取り付けられている。また、RCIC配管、RWCU配管及び再循環ドレン配管には、ケイ酸カルシウムの断熱材が設けられている。また、原子炉容器には、鏡板タイプの断熱材が付いている。このうち、繊維性、低密度で鉱物綿製のNUKON断熱材が本研究の主な対象となる。

3.5 ドライウェルとサプレッションプールのレイアウト

ドライウェルには、各種配管を支える支持材が多数存在する。また、この他に、保守作業用のグレーチングもあるが、これも配管支持の役割を果たしている。ドライウェルとサプレッションプールはベント管で接続されている。サプレッションプール内には、RHRやCSの吸込配管があり、そこには、ストレーナが設置されている。ストレーナは、14枚の孔あき（直径1/8インチの孔が1平方インチ当たり30個ある）鋼板から成り、表面積の約40%が流路となっている。

3.6 残留熱除去系と炉心スプレー系

RHRポンプの定格流量に必要なNPSHは水頭圧で約10ftである。吸込部でのNPSHは約24ftであるため、NPSH裕度は約14ftとなる。一方、CSポンプは、定格流量に必要なNPSHが水頭圧で約15ft、吸込部でのNPSHは約32ftであるため、NPSH裕度は約17ftとなる。なお、ストレーナ部での流速は、RHRが1.46ft/sec、CSが1.60ft/secである。

4. 閉塞に対する解析方法

本研究で使用した解析では、以下の5つの項目を扱っている。

- (1) 配管破断の発生頻度の推定及び破断位置の同定
- (2) 破断によって生成されるデブリの量と種類
- (3) ブローダウン時のドライウェル内デブリ移送
- (4) サプレッションプール内デブリ移送
- (5) NPSH喪失に繋がるストレーナ閉塞

4.1 配管破断の発生頻度

配管破断及びLOCAの発生頻度を推定するために、NUREG/CR-4792に示されている方法を用いて、配管溶接部の破損頻度を求める。MARK-I格納容器型BWRでは、再循環配管に、粒界応力腐食割れ(IGSCC)の影響を受けやすい304型ステンレス鋼を使用している。そこで、溶接部破断の発生頻度を推定するに当たり、まず、ローレンスリバーモア研究所(LLNL)が作成したIGSCC起因の両端ギロチン破断(DEGB)データを用いることとし、以下に示すような仮定を設定した。

- ・LLNLの2つのカテゴリ(漏洩とDEGB)のうち、DEGBカテゴリにおける破断のみ考慮する。
- ・再循環系の配管材質は304ステンレス鋼とし、主蒸気系、給水系、HPCI及びRHRにはIGSCCの影響を受けにくい炭素鋼が使用されているものとする。
- ・主蒸気系、給水系、HPCI及びRHRの溶接部破損頻度は再循環系と同様の範囲にあるものとする。
- ・IGSCCの影響を緩和するための方策としては、供用中検査のみ考慮する。

表Ⅲ4.1(原著のTable 4-1)に、溶接部破損頻度の推奨値を示すが、これらのデータは、供

用期間中検査による効果を考慮し、LLNLのデータに10分の1を乗じたものである。表Ⅲ4.2（原著のTable 4-2）には、溶接部当たりの破損頻度を示しているが、これらの値を用いて配管破断頻度が求められた（全溶接部についての破損頻度の総和）。結果的に、大LOCA（6インチ以上の口径のDEGB）の発生頻度は $1.0E-4/\text{yr}$ となる。

4.2 デブリ生成モデル

ドライウエル内にNUKON被覆材付の配管を有するBWRに対して、これまでの研究から得られた知見を基に破断ジェット流モデルを作成し、生成される繊維性デブリの種類と量を評価した。過去の実験的研究に基づき、NUREG-0897では、LOCAジェットによるデブリ生成は、破断口径、破断位置、破断時の圧力・温度、断熱材の種類と取付方法等に依存すると結論づけられている。しかし、NUREG-0897のモデルは、PWRを対象としたものであり、破断時の圧力を 150bars とし、また、破断ジェット流は無限に広がるものとしている。そこで、本研究では、BWRに適用するにあたり、BWRの運転圧力がPWRに比べて低いこと、ドライウエルはPWRの格納容器に比べて小さく多数の配管や構造物が設置されていること、等から、PWRに用いた”円錐型”ジェット流モデルの代わりに、図Ⅲ4.1（原著のFigure 4-3）に示すような”球形”モデルを用いることとした。また、繊維性デブリの他に、非繊維系物質の粒子型デブリの生成を考慮し、ドライウエル内で生成されたもののうち約 $2.6f^3$ がサブプレッションプールに移送されるものとした。

4.3 ドライウエル内デブリ移送

サブプレッションプールへ移送されるデブリの割合は、流路の形状、流速及びデブリの大きさに依存する。本研究では、以下に示す過去の実験や実例から得られた知見に基づきドライウエル内移動モデルを作成した。

- ・ドイツのHDR実験では、「繊維性デブリはブローダウンにより移送され様々な機器に付着するが、これらはサブプレッションプールに移送される可能性は小さい」ことが示された。
- ・Barsebaeck-2の事例では、「配管から脱落した断熱材デブリの約半分はドライウエル内に止まっている」ことが示された。Barsebaeck-2はMARK-II格納容器であり、MARK-I格納容器に比べてデブリが移送される流路（ベント管）の曲がり具合は少ないが、破断口径が1.5インチであり、大破断に比べて生成されたデブリの量は少ないと考えられる。

以上の知見を反映して、以下に示すドライウエル内デブリ移送モデルを作成した。

$$V_s^{SC} = (T_{bd}(t) + T_{wd}(t)) \cdot V_g^{SC}$$

ここで、 V_g^{SC} は、サイズグループSCのデブリの体積、 $T_{bd}(t)$ 及び $T_{wd}(t)$ はそれぞれブローダウン及びウォッシュダウンによる移送係数である。

4.4 サプレッションプール内デブリ移送

サブプレッションプール内のデブリは全て、最終的にはストレーナに到達するものと仮定して、移送モデルを作成した。このモデルでは、ストレーナに到達するデブリの種類や量を時間の関数として推定するが、この際、サブプレッションプール内に流入するデブリの体積、重力沈降、再浮遊、ストレーナへの付着等を考慮する。

4.5 ストレーナ圧力損失モデル

米国及び欧州諸国における実験から得られた知見に基づき、断熱材の材質に応じて、以下のようなストレーナの圧力損失評価モデルを作成した。

$$\begin{aligned} \text{鉍物綿} : \Delta H &= 123 U^{1.51} t^{1.36} & U : \text{ストレーナ部での接近流速} \\ \text{繊維ガラス} : \Delta H &= 1653 U^{1.84} t^{1.54} & t : \text{デブリ厚さ} \\ \text{NUKON製} : \Delta H &= 68.3 U^{1.79} t^{1.07} & \Delta H : \text{圧力損失} \end{aligned}$$

このうち、NUKON製の断熱材に対する評価モデルでは、デブリベッドの形成による圧力損失と、粒子型デブリの付着によるフィルター効果を考慮している。以下にその評価式を示す。

(デブリベッドによる圧力損失)

$$\frac{\Delta P}{t} = 3.5 S_u^2 (1-\varepsilon)^{1.5} [1 + 57(1-\varepsilon)^3] \mu V + \frac{0.66 S_u (1-\varepsilon)}{\varepsilon} \rho V^2$$

ここで、 ΔP はデブリベッドによる圧力損失、 t はデブリベッドの厚さ、 μ は流体の粘性、 ρ は流体の密度、 V は流体の速度、 ε はデブリベッドの多孔率である。

(粒子型デブリによるフィルター作用)

$$(\Delta P)_p = \left[1 + \frac{\rho_f}{\rho_p} \eta \right]^n \cdot (\Delta P)_0$$

ここで、 $(\Delta P)_0$ はデブリベッドによる圧力損失、 η はデブリベッドに対する粒子型デブリの質量比、 ρ_f はデブリベッドの密度、 ρ_p は粒子型デブリの密度である。なお、 n は、層流の場合1.5、乱流の場合1.0であり、その遷移領域では約1.2となる。

NUREG-0897で推奨されているように、ECCSポンプの喪失は、 $HPSH_{\text{margin}}$ ($NPSH_{\text{available}} - NPSH_{\text{required}}$) がデブリ閉塞による圧力損失より小さくなった場合に起こるものとし、また、圧力損失が $14ft$ の水頭圧 ($HPSH_{\text{margin}}$) より大きい場合にストレーナが完全に閉塞するものとする。

5.0 解析結果

5.1 ベースケースの解析結果

表Ⅲ5.1 (原著のTable 5-1) に、LOCA起因デブリによるECCSポンプのNPSH喪失頻度に関する計算結果を示す。同表から分かるように、ベースケースとして次の6ケースを設定し評価を行った。

ケースA-1：ブローダウン時にデブリ移送、重力沈降無し、粒子型デブリなし

ケースA-2：ブローダウン及びウォッシュダウン時にデブリ移送、重力沈降無し、粒子型デブリなし

ケースA-3：ブローダウン及びウォッシュダウン時にデブリ移送、低エネルギーECCS再循環モード時に重力沈降、粒子型デブリなし

ケースA-4：ブローダウン及びウォッシュダウン時にデブリ移送、高エネルギー及び低エネルギーブローダウン時に重力沈降、粒子型デブリなし

ケースA-5：ブローダウン及びウォッシュダウン時にデブリ移送、低エネルギーECCS再循環モード時に重力沈降、粒子型デブリあり

ケースA-6：ブローダウン及びウォッシュダウン時にデブリ移送、高エネルギー及び低エネルギーECCS再循環モード時に重力沈降、粒子型デブリあり

表Ⅲ5.2及び5.3（原著のTable 5-3及び5-4）には、系統別及び配管口径別の計算結果を示す。

5.2 パラメータ解析結果

ストレーナ表面積、RHR流量及び影響領域範囲（LOCA時のジェット流拡大モデル）をパラメータとして行った感度解析の結果を表Ⅲ5.4～5.6（原著のTable 5-5～5-7）に示す。表Ⅲ5.4に示すように、ストレーナ表面積を2倍にすると、中破断時のNPSH喪失の可能性は無くなり、大破断時の発生頻度もかなり減少する。また、表Ⅲ5.5に示すように、RHR流量を半分にした場合にも中破断時のNPSH喪失の可能性は無くなり、大破断時の発生頻度も減少するがその程度はストレーナ表面積の場合より小さい。これに対して、影響領域範囲を狭めた場合には（7L/Dから3L/D）、NPSH喪失の頻度は若干ではあるが大きくなる傾向がある（表Ⅲ5.6）。

6.0 炉心損傷頻度の推定

6.1 評価における検討項目

大LOCAに限定して、デブリ閉塞によるECCSポンプの機能喪失から炉心損傷に至る事故の発生頻度を評価した。この評価においては、NPSH喪失後の運転員による復旧操作（ストレーナのバックフラッシュ）や炉心冷却あるいは格納容器熱除去のための代替手段（ECCS水源の切替や他系統の利用）を考慮した。

6.2 イベントツリーと炉心損傷頻度評価結果

図Ⅲ6.1（原著のFigure 6-1）に、評価に用いたイベントツリーを示す。イベントツリー作成に当たっては、以下の仮定を設定した。

- ・ECCSによる炉心冷却はLOCA発生後24時間必要であるものとする。
- ・格納容器の破損は炉心冷却系の機能喪失に至るものとする。
- ・ECCSの各種機器は、サブプレッションプールを水源とする状態に置かれるものとする。
- ・ECCSポンプ1基のNPSH喪失は全ポンプの機能喪失に至るものとする。
- ・ECCSポンプの機能喪失は、LOCA発生後10分で起こるものとする。
- ・ECCS機能喪失時、炉心水位が3分の2以下に低下するまで炉心は健全であるものとする。
- ・代替手段を利用する際には、通常の点検が行われるものとする。
- ・代替手段として、給復水系は利用できないものとする。
- ・ストレーナ閉塞を検知する機能はないものとするが、ポンプの異常検出機能は運転員が代替手段を講じる際に有効であるものとする。
- ・ECCSポンプ水源の復水貯蔵タンク（CST）への切替についてはクレジットを取らないものとする。

図Ⅲ6.1に示すように、11種の炉心損傷事故シーケンスが識別されるが、このうちの7種（シーケンスCD-2～CD-8）がNPSH喪失を含むものである。これら7種のシーケンスによる炉心

損傷頻度(CDF)は $2.5E-5/\text{yr}$ (対象プラントに対するIPEの結果は $7.8E-6/\text{yr}$ である)、また、ドミナントシーケンスはCD-8及びCD-5であり、それぞれ、 $2.0E-5/\text{yr}$ 及び $5.0E-6/\text{yr}$ となっている。なお、大LOCA後の条件付き炉心損傷確率は、0.25 (CDFを大LOCAの発生頻度 $1.0E-4/\text{yr}$ で割る)となる。

6.3 パラメータ解析

上記の評価では、NPSH喪失後の代替手段の利用に失敗する確率として0.25 (IPEのデータを使用)を用いたが、BWROGの評価では0.04と推定されている。この値を用いると、CDFは $4.2E-6/\text{yr}$ となる。従って、この場合には、大LOCA後の条件付き炉心損傷確率は0.04となる。

BWR-2及び-3のプラントに対しては、それぞれのIPEで使用した大LOCAの発生頻度と、上記の条件付き確率(0.25及び0.04)を用いて、NPSH喪失に関わるCDFを推定することができるものとした。その結果を表Ⅲ6.1 (原著のTable 6-1)に示す。一方、BWR-5及び-6については、CSTを水源とする高圧炉心スプレー系が設置されており、サブプレッションプール内ストレーナ閉塞によるNPSH喪失が起こっても崩壊熱レベルが低下しているため、時間的余裕がかなりあることから、対象プラントであるBWR-4よりCDFは小さいと考えられる。

6.4 NPSH喪失問題に関する欧州諸国の対応策

一方、欧州諸国では、NPSH喪失問題に対する緩和策として、(1)大容量ストレーナの利用、(2)ストレーナ部の差圧検出器の設置、及び、(3)バックフラッシュ設備の設置を検討してきた。これらの対策を考慮すると(NPSH喪失確率を1.0から0.2に、運転員によるストレーナ閉塞の認知失敗確率を0.8から0.1、バックフラッシュによる復旧失敗確率を1.0から0.2に変更)、CDFは $1.4E-6/\text{yr}$ となる。さらに、代替手段の利用について、BWROGの評価結果である0.04を用いると、CDFは $2.3E-7/\text{yr}$ となる。

6.5 まとめ

以上の結果をまとめると、NPSH喪失によるECCSポンプの機能喪失はCDFに大きな寄与をもたらす可能性がある。本研究は、大LOCAに限定した評価ではあるが、より小さな口径の配管破断に対してもNPSH喪失による寄与は重要であると考えられる。また、NPSH喪失時の代替手段の利用可能性はCDFの主たる寄与因子であるものと考えられる。なお、本研究における評価結果には不確かさがあることに注意されたい。

表Ⅲ4.1 溶接部ギロチン破断の発生頻度推奨値 (NUREG/CR-6224、Table 4.1)

Table 4-1
Recommended Weld DEGB Frequency Estimates

Pipe Category	Per-weld DEGB Frequency (1/Rx-yr)
12" Recirculation (304SS)	2E-06 ¹
22 - 28" Recirculation (304SS)	2E-07 ¹
Main Steam ²	2E-07
Feedwater ²	2E-07
HPCI ²	2E-07
RHR ²	2E-07

Notes:

1. Derived by reducing LLNL data by a factor of 10 to account for in-service inspection.
2. Main steam, feedwater, HPCI, and RHR welds assumed to have same failure frequency as 22-28" recirculation system welds.

表Ⅲ4.2 評価対象BWRに対する溶接部ギロチン破断の発生頻度 (NUREG/CR-6224、Table 4.2)

Table 4-2
Weld DEGB Frequency Data for Reference BWR

Pipe Category	Per-weld DEGB Frequency (1/Rx-yr)
1" - 10" Recirculation	1E-06
16" Recirculation	2E-06
22" Recirculation	2E-07
All Main Steam	2E-07
All Feedwater	2E-07
All HPCI	2E-07
All RHR	2E-07

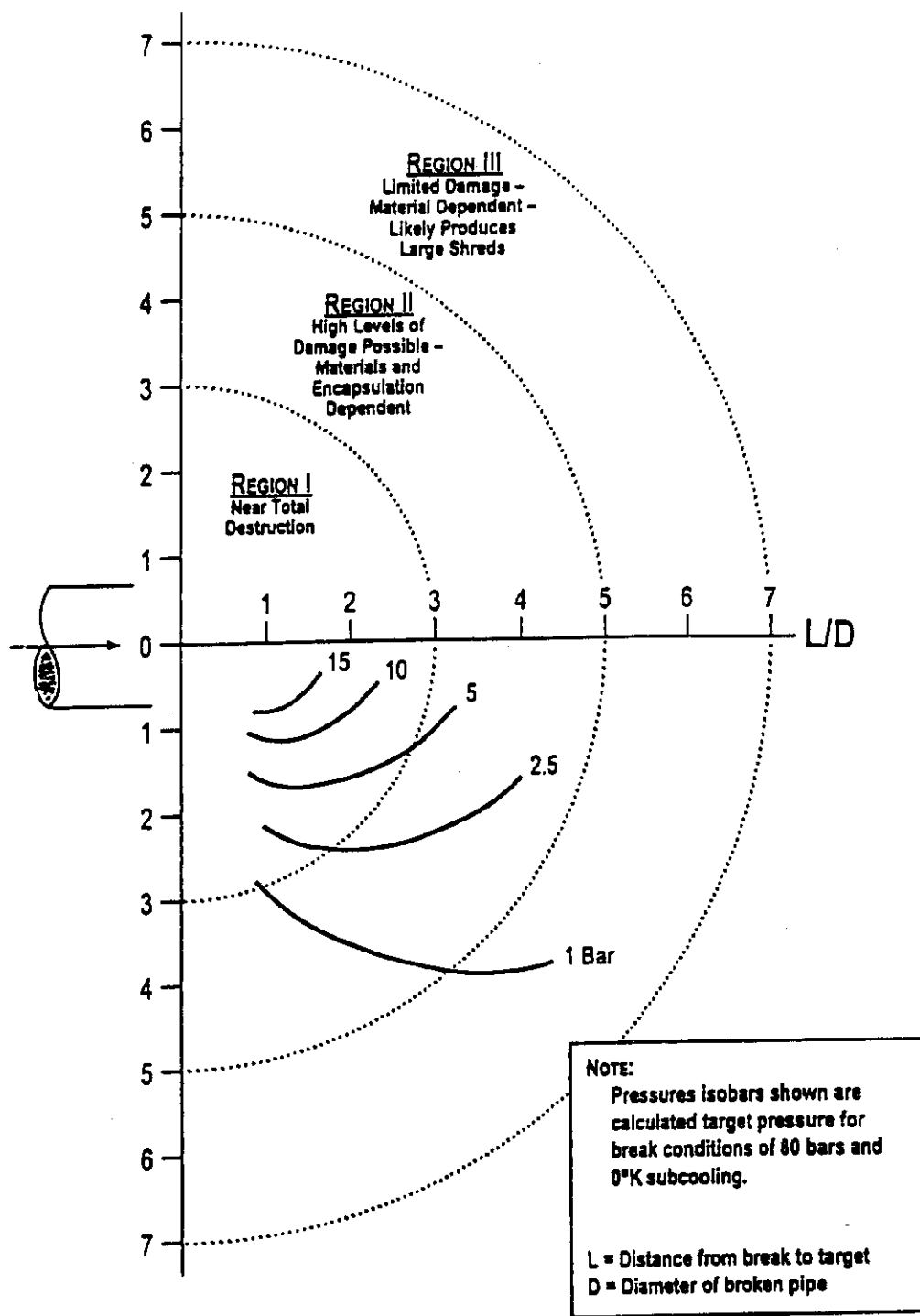


Figure 4-3. Three Region BWR Debris Generation Model Used in the Present Study

図III.4.1 BWRに対する3領域デブリ生成モデル (NUREG/CR-6224、Figure 4-3)

表III5.1 評価対象プラントに対するNPSH喪失の発生頻度 (NUREG/CR-6224、Table 5-1)

Table 5-1

Frequency of Loss of NPSH margin for the Reference Plant -
Result of the Case Study

Case No.	Case Description	Frequency of Loss of NPSH (1/Rx-yr)		
		MLOCA	LLOCA	Total
A.1.	Fibrous insulation debris transport during blowdown. No debris settling. Particulates not included.	2.3E-05	7.7E-05	1.0E-04
A.2.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and during washdown. No debris settling. Particulates not included.	2.6E-05	8.4E-05	1.1E-04
A.3.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Debris settling during low energy ECCS recirculation phase. Particulates not included.	6.0E-06	6.2E-05	6.8E-05
A.4.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Debris settling during low energy and high energy blowdown phases. Particulates not included.	0.0	5.9E-05	5.9E-05
A.5.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Debris settling during low energy ECCS recirculation phase. 2.6 ft ³ of sludge and 2.6 ft ³ of drywell particulates included.	5.9E-05	1.01E-04	1.6E-04
A.6.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Debris settling during low energy and high energy recirculation phases. 2.6 ft ³ of sludge and 2.6 ft ³ of drywell particulates included.	4.9E-05	1.01E-04	1.5E-04

表III.5.2 系統別ECCSストレーナ閉塞事象の発生頻度 (NUREG/CR-6224、Table 5-3)

Table 5-3
ECCS Strainer Blockage Estimates by System
(Base Case)

System	Pipe Break Frequency (1/Rx-Year)	Blockage Frequency (1/Rx-Year)
Recirculation	1.2E-04	1.2E-04
Main Steam	2.3E-05	2.2E-05
Feedwater	1.4E-05	1.4E-05
HPCI Steam Line	1.2E-06	1.2E-06
RHR Lines	3.2E-06	3.2E-06
Overall	1.6E-04	1.5E-04

表III.5.3 配管口径別ECCSストレーナ閉塞事象の発生頻度 (NUREG/CR-6224、Table 5-4)

Table 5-4
ECCS Strainer Blockage Estimates by Pipe Diameter
(Base Case)

Diameter (in.)	Pipe Break Frequency (1/Rx-Year)	Blockage Frequency (1/Rx-Year)
1	2.8E-05	1.9E-05
1.25	2.0E-06	2.0E-06
2	4.4E-06	2.0E-06
4	2.6E-05	2.5E-05
6	4.8E-06	4.8E-06
10	5.3E-05	5.3E-05
16	1.8E-05	1.8E-05
18	7.4E-06	7.4E-06
20	1.2E-06	1.2E-06
22	1.5E-05	1.5E-05
Overall	1.6E-04	1.5E-04

表III5.4 ストレーナ表面積を2倍にした場合のNPSH喪失頻度への影響
(NUREG/CR-6224、Table 5-5)

Table 5-5
Effect of Doubling Strainer Area on the Frequency
of Loss of NPSH Margin for the Reference Plant

Case No.	Case Description	Frequency of Loss of NPSH (1/Rx-yr)		
		MLOCA	LLOCA	Total
B.1.	Fibrous insulation debris transport during blowdown. No debris settling. Particulates not included.	0.0	3.3E-05	3.3E-05
B.2.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and additional material during washdown. No debris settling. Particulates not included.	0.0	4.0E-05	4.0E-05
B.3.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Debris settling during low energy ECCS recirculation phase. Particulates not included.	0.0	9.6E-06	9.6E-06
B.4.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Debris settling during low energy and high energy blowdown phases. Particulates not included.	0.0	3.6E-06	3.6E-06
B.5.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Debris settling during low energy ECCS recirculation phase. 2.6 ft ³ of sludge and 2.6 ft ³ of drywell particulates included.	0.0	1.8E-05	1.8E-05
B.6.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Debris settling during low energy and high energy recirculation phases. 2.6 ft ³ of sludge and 2.6 ft ³ of drywell particulates included.	0.0	9.6E-06	9.6E-06

表III.5.5 ストレーナ流量を半分にした場合のNPSH喪失頻度への影響
(NUREG/CR-6224、Table 5-6)

Table 5-6
Effect of Reduction of Flow in Half on the Frequency
of Loss of NPSH Margin for the Reference Plant

Case No.	Case Description	Frequency of Loss of NPSH (1/Rx-yr)		
		MLOCA	LLOCA	Total
C.1.	Fibrous insulation debris transport during blowdown. No debris settling. Particulates not included.	0.0	5.5E-05	5.5E-05
C.2.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and additional material during washdown. No debris settling. Particulates not included.	0.0	6.2E-05	6.2E-05
C.3.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Debris settling during low energy ECCS recirculation phase. Particulates not included.	0.0	1.8E-05	1.8E-05
C.4.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Debris settling during low energy and high energy blowdown phases. Particulates not included.	0.0	1.4E-05	1.4E-05
C.5.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Debris settling during low energy ECCS recirculation phase. 2.6 ft ³ of sludge and 2.6 ft ³ of drywell particulates included.	0.0	3.3E-05	3.3E-05
C.6.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Debris settling during low energy and high energy recirculation phases. 2.6 ft ³ of sludge and 2.6 ft ³ of drywell particulates included.	0.0	2.3E-05	2.3E-05

表III.5.6 破損領域3L/Dを用いた場合のNPSH喪失頻度への影響
(NUREG/CR-6224、Table 5-7)

Table 5-7

Effect of Using 3 L/D Zone of Destruction Assumption on the Frequency of Loss of NPSH Margin for the Reference Plant

Case No.	Case Description	Frequency of Loss of NPSH (1/Rx-yr)		
		MLOCA	LLOCA	Total
D.1.	Fibrous insulation debris transport during blowdown. No settling allowed. Particulates not included.	3.4E-05	9.6E-05	1.3E-04
D.2.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Settling not allowed. Particulates not included.	3.4E-05	9.6E-05	1.3E-04
D.3.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Settling allowed during low energy ECCS recirculation phase. Particulates not included.	3.2E-05	6.8E-05	1.0E-04
D.4.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Settling allowed during low energy and high energy phases. Particulates not included.	0.0	6.5E-05	6.5E-05
D.5.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Settling allowed during low energy ECCS recirculation phase. 2.6 ft ³ of sludge and 2.6 ft ³ of drywell particulates included.	5.8E-05	1.01E-04	1.6E-04
D.6.	Fibrous insulation debris transport during blowdown and washdown. Settling allowed during low energy and high energy phases. 2.6 ft ³ of sludge and 2.6 ft ³ of drywell particulates included.	5.5E-05	9.5E-05	1.5E-04

表Ⅲ6.1 炉心損傷事故発生頻度に対するNPSH喪失の寄与
(NUREG/CR-6224、Table 6.1)

Table 6-1
Estimates of CDF Contributions from ECCS NPSH Loss at BWR 4/Mark I Plants

Plant	Large LOCA Freq. (per Rx-yr)	CDF Calculated in IPE (per Rx-yr)	Estimated CDF Contrib. from NPSH Loss (per Rx-yr)		Contrib. of Large LOCA to IPE CDF (per Rx-yr)	Notes
			Base Case Results (0.25 ACCU ²)	Parametric Analysis (0.04 ACCU ²)		
Ref. Plant	1E-04 (this study)	7.8E-06	2.5E-05	4.2E-06	<8E-08	CDF from NPSH loss based on LOCA freq. of 1E- 04/Rx-yr
	1.3E-04 (IPE)					
Plant No. 1 ¹	5.9E-04 (IPE)	4.8E-05	1.5E-04	2.4E-05	<7E-07	IPE CDF represents a mean value
Plant No. 2 ¹	1E-04 (IPE)	8.0E-05	2.5E-05	4E-06	4.7E-08	IPE CDF represents a mean value
Plant No. 3 ¹	1E-04 (IPE)	1.9E-06	2.5E-05	4E-06	<1.9E-08	IPE CDF represents a mean value
Plant No. 4 ¹	2.6E-04 (IPE)	2.2E-05	6.5E-05	1.0E-05	2.5E-08	IPE CDF is for unit 2; unit 1 CDF is 2.1E-05/Rx- yr

¹ Extrapolations from base case results and from parametric analysis results

² ACCU = Alternate Core Cooling Unavailability

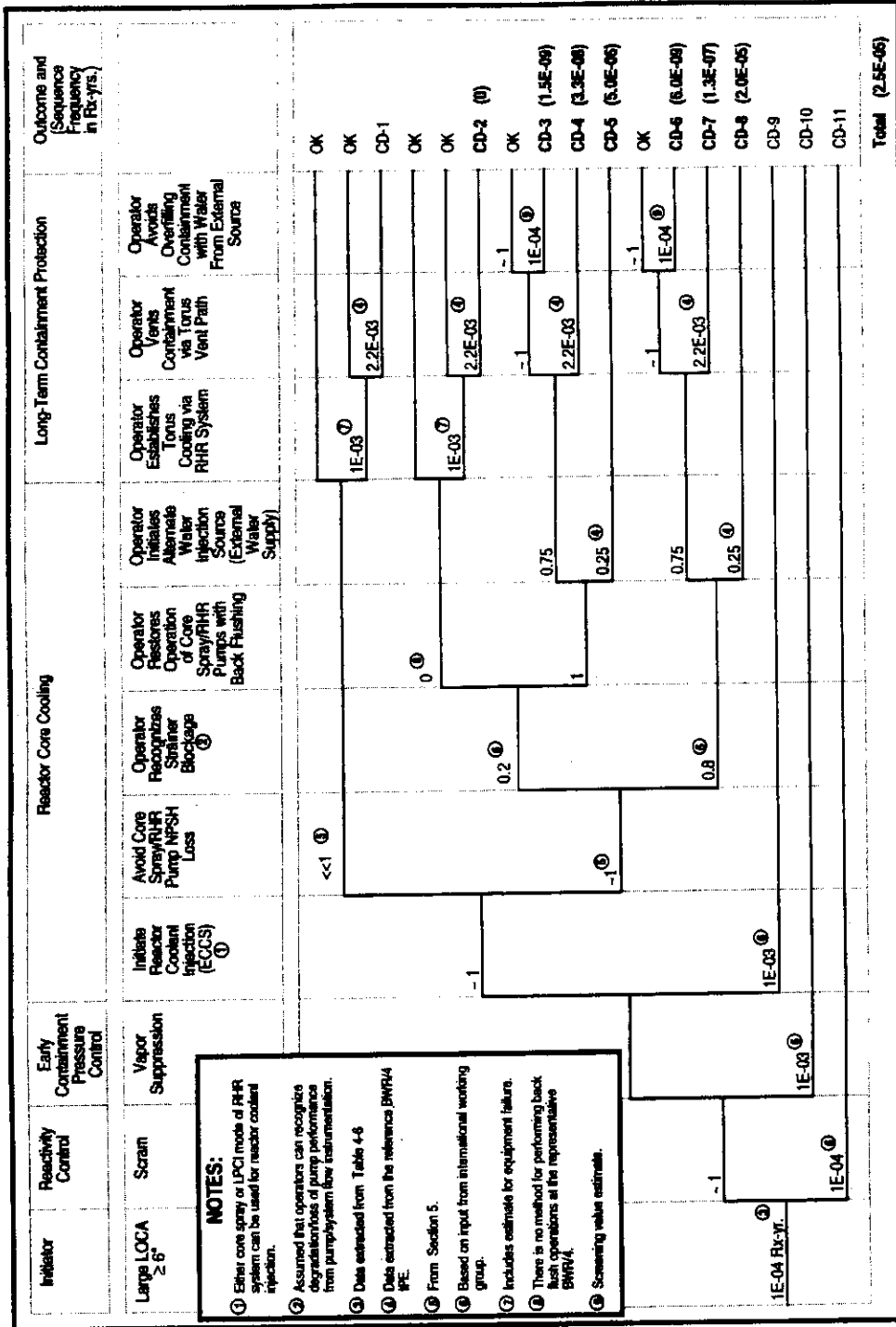


Figure 6-1. Simplified Event Tree for Large LOCA at the Reference BWR/4

図 III 6. 1 大破断LOCAに対するイベントツリー (NUREG/CR-6224, Figure 6-1)