

外部電源に係る 現行規制体系と見直し動向について

2011年 10月24日
原子力安全・保安院

1. 現行規制における外部電源の位置付け

□安全設計*1

- 重要度の特に高い安全機能を有する構築物、系統及び機器が、その機能を達成するために電源を必要とする場合においては、外部電源又は非常用所内電源のいずれからも電力の供給を受けられる設計であること【指針48 1】
- 外部電源系は、2回線以上の送電線により電力系統に接続された設計であること【指針48 2】

□安全重要度分類*2

- 外部電源(送電線、変圧器、開閉所)は、安全重要度分類において異常発生防止系(PS)のうち、一般の産業施設と同等以上の信頼性を確保し、かつ維持するクラス3(PS-3)に分類
(異常影響緩和系(MS)としての安全機能の要求はない)
(参考)非常用所内電源系はMS-1

□耐震設計*3

- 外部電源系統設備のうち、発電所構内の開閉所は、耐震設計審査指針の耐震重要度分類の考え方に基づいて、一般産業施設と同等の安全性を保持すればよい耐震Cクラスに分類
(参考)非常用所内電源系は耐震Sクラス

□安全評価*4

- 「事故」の評価において、工学的安全施設の動作を期待する場合、外部電源が利用できない場合を想定しても、炉心の溶融あるいは著しい損傷のおそれがなく、かつ、事象の過程において他の異常状態の原因となるような2次的損傷が生じなく、さらに放射性物質の放散に対する障壁の設計が妥当であることを確認

*1 原子力安全委員会「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」

*2 原子力安全委員会「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」

*3 原子力安全委員会「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」

*4 原子力安全委員会「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」

2. 外部電源信頼性に関する海外の動向

	米国	英国	独国	仏国
外部電源系の構成	10CFR50附則A GDCの指針17電気系統で、送電網から所内配電系統へは物理的に独立した2つの回路(送電線路は必ずしも完全分離されなくてもよい。)からの電力供給を要求。 なお、例えばアリゾナ州のPalo Verde原子力発電所(1～3号機)の場合、確率論的なリスク評価を動機とし、事業者の自主的な補完として7回線を敷設。	Sizewell Bでは、送電網との接続が4本で各々は分離されている。	原子力発電所は各々2つの外部送電網と接続。 非常用電源系とは別に、近隣発電所と直接結線される場合が多い。	外部電源系は独立2回線。
設計目標	10CFR50附則A GDCの指針17で、外部電源回路は所内交流電源及び他方の外部電源回路の喪失後、燃料及び原子炉冷却材圧力バウンダリの設計条件を超えないことを保証できる十分な時間内に利用可能とする設計を要求。	—	—	—
共通要因故障の低減	10CFR50附則A GDCの指針17で、当該炉の発生電力喪失、送電網からの電力喪失あるいは所内電源の喪失によって、残る他の電源が喪失する可能性が極力ない設備とすることを要求。	—	—	—
運転員措置	R.G.1.155で、外部電源が利用できない場合、外部電源の復旧及び近隣の電源を利用するために必要な措置を手順書に含めることを要求。	—	SBO対策の一つとして、最初の10時間は運転員措置なしで高温未臨界状態を維持可能要求(現実的な想定の場合24時間)	—
SBOへのプラント耐性	R.G.1.155で、プラント毎に指定される所要の最小時間に耐えかつ回復する能力を要求。 NRCのタスクフォース推奨の改訂最小時間は8時間。延長耐久時間として72時間を推奨しその間は炉心等の健全性維持。	—		—

3．原子力安全委員会における指針類の見直し動向（外部電源関係）

□安全設計審査指針類の見直しについて

- 原子力安全委員会では、平成23年3月11日に発生した地震及び津波に係る知見、事故の教訓を踏まえ、安全設計審査指針及び関連指針類の見直しを行うため、安全設計審査指針等検討小委員会を設置。
- 同小委員会は、平成23年7月15日に第1回会合を開催、これまで6回開催。
- これまでの議論では、全交流電源喪失(SBO)に関する検討を実施。全交流電源喪失事象対策の基本的考え方を整理するとともに、安全設計審査指針における要求事項等の見直しを検討中。

（参考資料）

- ・別添1：発電用軽水型原子炉施設の安全設計審査指針の検討について（原子力安全委員会 安全設計審査指針等検討小委員会 第6回会合資料、平成23年10月18日）
- ・別添2：「指針27. 電源喪失に対する設計上の考慮」を中心とした全交流電源喪失に関する検討報告(仮題)(たたき台 案1) 第4回会合資料、平成23年9月8日）

発電用軽水型原子炉施設の安全設計審査指針の検討について ―全交流動力電源喪失(SBO: Station Black Out)対策としての技術的要件一覧―(案)

※今般の福島第一原子力発電所の事故の教訓を踏まえ、本件は、基本設計要件のみならず、詳細設計、運転管理並びに炉心損傷防止及び炉心損傷に至った場合の影響緩和を見通して技術的要件を整理

平成23年10月18日

原子力安全委員会事務局

SBOの定義： 発電用軽水型原子炉施設におけるSBOとは、全ての外部交流電源及び所内非常用交流電源からの電力の供給が喪失した状態をいう。

SBOには、送電線の故障等による外部電源の喪失や、非常用ディーゼル発電機の起動失敗のほか、所内交流母線、配電盤の故障等により電力が喪失する場合も含まれる。

＜SBO対策の基本的考え方＞ (1)SBOの発生確率をきわめて低いものとする	＜SBO対策の基本的考え方＞ (2)SBOが発生した際には、原子炉を安全に停止し、一定時間 にわたって停止後の冷却を確保し、かつ、復旧できること	＜SBO対策の基本的考え方＞ (3)SBOの下で炉心の損傷に至った場合においても、環境への放射性 物質の放出を十分に低く制限するための措置が可能であること
■SBO の発生防止全般 ◎(新規)主発電機、外部電源、非常用所内電源設備いずれかの電源供給の喪失によって起因して、あるいはこれに伴って、他の電源からの電力供給が喪失する可能性が極めて少ないこと。 ◎(新規)他の原子炉施設と電気系統の一部を共有する場合、それにより他の原子炉施設の状態が非常用母線への電力供給に悪影響を与えることがなく、かつ、他の原子炉施設の安全機能に悪影響を与えることがないこと。また、非常用所内電源系の共用は行わないこと。 ◎(現行4.)電源系統は、系統の重要な部分の適切な定期的試験及び検査が可能な設計であること。 ◇ 電源に係る運転上の制限、許容待機除外時間等の設定は、SBO対策の基本的考え方に整合し、SBOによるリスクの抑制に有効なものであること。 ◇ SBOによるリスクの抑制のため、国内外の事故故障情報を適時に分析し反映を図ること。 ■外部電源系 ◎(現行2.)外部電源系は、物理的に独立し、異なる外部電源に接続された2回線を含む送電線により、電力系統に接続された設計であること。 ➢「外部電源系」とは、外部電源(電力系統)又は主発電機からの電力を所内配電系統に供給するための一連の設備をいう。 ■非常用電源系 ◎(現行1.)重要度の特に高い安全機能を有する構築物、系統及び機器が、その機能を達成するために電源を必要とする場合においては、外部電源(電力系統)又は非常用所内電源のいずれからも電力供給を受けられる設計であること。 ➢「非常用所内電源系」とは、非常用所内電源設備(非常用ディーゼル発電機、バッテリー等)及び工学的安全施設を含む重要度の特に高い安全機能を有する設備への電力供給設備(非常用母線スイッチギヤ、ケーブル等)をいう。 ➢「重要度の特に高い安全機能」については、別に「重要度分類指針」において定める。 ◎(現行3.)非常用所内電源系は、多重性又は多様性及び独立性を有し、その系統を構成する機器の単一故障を仮定しても次の各号に掲げる事項を確実に行うのに十分な容量及び機能を有する設計であること。 (1) 運転時の異常な過渡変化時において、燃料の許容設計限界及び原子炉冷却材圧力バウンダリの設計条件を超えることなく原子炉を停止し、冷却すること。 (2) 原子炉冷却材喪失等の事故時の炉心冷却を行い、かつ、原子炉格納容器の健全性並びにその他の所要の系統及び機器の安全機能を確保すること。 ◎(新規)非常用所内電源系は、想定される外部電源事故、電気系統との外部電源(電力系統)との干渉、電気系統の構成要素間の干渉、非常用所内電源系以外の部分における故障などの電氣的影響から適切に保護されること。	■SBO 発生時の冷却機能の維持について ◎ 原子炉施設は、一定時間の全交流動力電源喪失に対して、原子炉を安全に停止し、かつ、停止後の冷却(使用済燃料貯蔵設備の冷却を含む。)を確保し、復旧できる設計であること。 なお、一定時間の設定の妥当性について、プラントの特徴を踏まえ適切に評価されること。 ➢ 「一定時間」とは、大規模な自然事象を含め、原子炉施設内外における広範な災害を伴う状況において、所要の交流電源の復旧並びに原子炉施設を安定的に冷温停止に至らしめるために必要な資源と態勢を確保するために十分な時間をいう。 ➢ 「停止後の冷却を確保し」とは、原子炉冷却系及び格納容器がそれぞれの最高使用圧力、最高使用温度を超えることがなく、例えば、1次系ポンプにおいて有意な漏えいが生じないことなど、それぞれのバウンダリが健全性を維持し、炉心が冠水状態を維持し、使用済燃料プール温度が飽和温度以下を維持していることをいう。 ➢ 「復旧できる」とは、当該原子炉施設を冷温停止に移行し安定に維持できること並びに使用済燃料プール温度を最高使用温度以下に安定に維持できるこという。 ➢ 「耐久時間」については、電源喪失に対する設計上の考慮においては、SBO耐久時間が評価されること。ここでは、長時間のSBOを想定し、例えば、以下の場合について、炉心の冷却及び格納容器の過圧防止維持できる時間を評価すること。 (a) 代替交流電源が、使用可能である場合。 (b) 代替交流電源が未作動であり、直流電源のみが使用可能である場合 (c) 代替交流電源が未作動であり、代替(後備)直流電源の使用や、再充電が可能である場合 これらの評価により、耐久時間の確保のために重大な意味を持つ設備や運転手順を同定すること。これらの設備の信頼性や運転手順の実効性を確保するため、適切な配慮がなされていることを確認すること。 ◎(新規)原子炉施設の設計上の想定を超える自然現象等に対して最小限の安全機能を維持する上で、電気系統の機能喪失が明らかな決定要因となることがないよう設計されなければならない。 ◎(新規)SBOが発生した際の備えとして、代替電源設備を設置すること。代替電源設備は、非常用所内電源系に対して独立性を有し、非常用所内電源系と相まって設置位置及び設計等についての多様性を満足し、自立した設備構成を有すること。 ➢ 代替電源設備の容量については、最小限の安全機能を維持するために必要な負荷に見合う容量が考慮されること。 ➢ 代替電源設備は、専用の燃料供給設備や制御設備などの付属設備を備えたものとし、必要に応じて専用の無停電電源装置や電源盤などを備えるものとし、他の系統から独立した設備構成であること、かつ、代替電源設備は、地震や浸水などの自然現象の発生において所定の機能を果たすよう設計、配置すること。また、代替電源設備の原子炉間での共用は、原則禁止とする。専用の電気系統を設けず(電源盤等)を共用する場合は、その信頼性を立証すること。 ■SBO時の原子炉冷却系の性能確認について ○ SBO時に原子炉冷却を維持するためにその機能を期待している系統、すなわち、動力用交流電源を必要とせず、所内非常用直流電源によって制御可能な系統について、SBO対策の基本的考え方(2)「SBOが発生した際には、原子炉を安全に停止し、一定時間にわたって停止後の冷却を確保し、かつ、復旧できること」との関わりにおいて、長時間のSBO時の性能が詳細にわたって確認されること。ここでは、今般の福島第一原子力発電所の事故の経緯の詳細な分析を参考とし、直流電源の枯渇や故障によって電圧が低下したときのこれらの系統の挙動や、電圧が復帰したときの挙動についても把握されること。 ◇ 本設の系統やこれに係る運転手順と、シビアアクシデント防止のための対策とが、国内外の事故故障等情報の分析、確率論的安全性評価手法の活用による潜在的脆弱性の抽出などの継続的な取組と相まって、間隙のない多重防護の関係を構成することを確認すること。 ■代替電源時間の情報管理 ◇ 代替電源設備による原子炉施設の最小限の安全機能を維持するための設備の位置、接近方法等の情報については、適切に管理すること。	■シビアアクシデントの防止策について ◇ SBO対策の基本的考え方(2)「SBOが発生した際には、原子炉を安全に停止し、一定時間にわたって停止後の冷却を確保し、かつ、復旧できること」を満足するために、長時間のSBO時に特有の制約、すなわち、制御用の直流電圧の消失や、制御用の圧縮空気圧の消失、これらに伴う弁類の開閉や、予想される困難の下での設備ならびに手順(SBO対策の基本的考え方(2)の範囲を超えるもの)の妥当性が考慮されること。 ■シビアアクシデントの影響緩和策について ◇ SBO対策の基本的考え方(3)「SBOの下で炉心の損傷に至った場合においても、環境への放射性物質の放出を十分に低く制限するための措置が可能であること。」を満足するために、長時間のSBO時に特有の制約として、上記に加え、SBO下で炉心損傷が発生したときの、原子炉建屋(BWR)やアニュラス部(PWR)における水素爆発のリスク、放射線量率や放射能濃度の上昇による作業の困難等が考慮されること。 ■原子炉施設の設計上の想定を超える外部事象への対処能力の評価について 原子炉施設の設計上の想定を超える自然現象や、設計上の想定を大きく超える外的起因事象への対処能力を把握することは、今後の安全確保、安全性向上のために重要である。 原子力安全委員会は、このような観点から、発電用原子炉施設の安全性の総合的な評価を行うことを原子力安全・保安院に対して求めている。ここでは、決定論的な手法をとりつつも、これまでの内的事象 PSA、地震・津波PAS等の知見を活用することを求めている。このような評価は、今般の事故で顕在化したような原子炉施設の潜在的脆弱性を発見し、排除するために有用な手段であると考えられ、今後、継続的に実施されるべきである。 安全設計審査指針やその適用を含め、安全確保のための方法や手段は、その妥当性について絶えず問い直すことが重要であり、そのための有効な手段の一つとして、決定論的及び確率論的な安全評価の手法が継続的に改良される必要がある。

＜凡例＞ ◎：基本設計段階からの要件と考えられる事項、○：詳細設計以降の要件と考えられる事項、◇：運転管理段階以降の要件と考えられる事項、
下線部又は網掛け部なし：現行の安全設計審査指針における要求事項等、下線部：現行の安全審査指針における要求事項等に追加した事項、網掛け部：今回追加した事項
□□□□：用語の定義等の補足

(原子力安全委員会事務局)

設計小委第 4-1-1 号

「指針 27. 電源喪失に対する設計上の考慮」を中心とした全交流電源喪失
に関する検討報告(仮題)
(たたき台 案 1)

平成 23 年 9 月 8 日
安全設計審査指針等検討小委員会

はじめに

東京電力株式会社福島第一原子力発電所 1～3 号機では、平成 23 年 3 月 11 日の地震とそれに引き続き発生した津波によって全交流電源喪失(以下「SB0」という。)の事態に陥り、この状態が長時間継続したことによって大規模な炉心損傷に至った。この際に原子炉容器ならびに格納容器が過温、過圧によって損傷し、水素爆発等によって原子炉建屋の閉じ込め機能も劣化したことから、大量の放射性物質が環境中に放出された。

当小委員会ではこの事故を踏まえ、「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」(平成 2 年 8 月 30 日原子力安全委員会決定、以下「安全設計審査指針」という。)の関連条文を改定することを含め、規制全般にわたる SB0 事象への対処策について検討を行った。

1. 安全設計審査指針指針 27「電源喪失に関する設計上の考慮」の分析・評価

1. 1 指針 27「電源喪失に対する設計上の考慮」の策定経緯

指針 27 は、“短時間の SB0 に対して、原子炉を安全に停止し、かつ、停止後の冷却を確保できる設計であること”を求めている。この要求内容は、昭和 52 年に原子力委員会が決定した「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」中の指針 9「電源喪失に対する設計上の考慮」を踏襲したものである(このため、以下では昭和 52 年の指針 9 も含めて「指針 27」と呼ぶ。)。昭和 52 年にこの要求が導入された経緯や、“短時間”と限定が付された根拠は不明であるが、後者については、送電事故の頻度と非常用ディーゼル発電機の起動失敗確率に基づいて、わが国では長時間の SB0 が発生する確率が十分に低いという判断がなされたものと推定される¹。

1. 2 指針 27 の特徴

指針 27 は、個別の機器、系統、構築物(SSC)への要求ではなく、原子炉施設全体(システム)への機能要求であって、この点で、指針 2「自然現象に対する設計上の考慮」、指針 3「外部人為事象に対する設計上の考慮」、指針 5「火災に対する設計上の考慮」と共通の性格をもつ。ただし、これらとは異なり、SB0 という特定のプラント状態を対象としている。

¹ 当時の検討資料(当小委員会参考資料第 3-4 号)では、30 分以内と 30 分以上の SB0 発生確率のごく簡単な評価が行われている。

また、SBO という多重故障事象を対象としていることは、安全設計審査指針の中では異質である。なお、昭和 52 年の設計指針では、指針 9 は IV.「原子炉施設全般」に分類されていたが、平成 2 年の設計指針では、指針 27 は VI.「原子炉冷却系」に分類されている。これは、次節 1. 3 で述べるような実際の適用を念頭においた整理と推測される。

1. 3 指針 27 の実際の適用

本指針の要求内容は、現在の設計においては、短時間の SBO 時に炉心（BWR）ないし 1 次系（PWR）を冷却する機能をもつ系統の存在と、これらの系統の動作を制御するための直流電源の容量とによって満足されていると判断されてきた。

該当する系統として、BWR では、指針 23「原子炉冷却材補給系」が関わる原子炉隔離時冷却系（RCIC）や指針 25「非常用炉心冷却系」が関わる高圧注入系（HPCI）が、PWR では、指針 24「残留熱を除去する系統」が関わるタービン動補助給水系（TDAFW）がある。ただし、これらは指針 27 の要求によって設置されているものではない。

昭和 52 年以後、原子炉施設の安全審査においては、“短時間”とは 30 分間以下のことであると共通的に解釈する慣行がとられてきたため、指針 27 の要求は、30 分間の SBO 時に冷却機能を維持するために十分な蓄電池の容量等への要求と解釈されている。

1. 4 策定後の指針 27 の妥当性についての検討経緯

昭和 52 年の安全設計審査指針の策定以来、同指針の指針 9（今日の指針 27）における“短時間”の根拠の妥当性、特に外部電源喪失の確率については、さまざまな機会に検討が行われた模様である²。

原子力施設事故・故障分析評価検討会全交流電源喪失事象検討ワーキング・グループによってまとめられた報告書³（平成 5 年）では、米国 NRC が 1988 年に制定したいわゆる SBO 規則（10CFR50.63）における要件等との対比の下に、わが国の代表プラントにおける SBO 発生頻度や SBO 耐久能力を検討し、わが国では外部電源及び非常用ディーゼル発電機の信頼性が高く、SBO 耐久能力（SBO 時の蓄電池及び冷却用水源による耐久時間）は、（安全審査においては慣行として 30 分間しか要求されていないものの）実力値としては PWR で 5 時間以上、BWR で 8 時間以上であって米国 NRC の SBO 規則を満たしているとしている。ただし、SBO 規則が降雪、ハリケーン、竜巻等の外的事象の想定を求めている（地震、洪水は含まれていない）のに対して、本検討では外的事象による SBO の可能性は論じられていない。

² たとえば、当小委員会参考資料第 3-5 号。

³ 原子力施設事故・故障分析評価検討会全交流電源喪失事象検討ワーキング・グループ：「原子力発電所における全交流電源喪失事象について」（平成 5 年 6 月 11 日）

また、同ワーキング・グループによる報告書を含め、内の事象を起因事象とする確率論的安全評価（PSA）によれば、わが国の代表的プラントにおける SB0 による炉心損傷頻度は小さいとされている。

このように、昭和 52 年の安全設計審査指針において導入された「電源喪失に対する設計上の考慮」に関する要求では、実績に基づく確率論的考察に基づいて、短時間の SB0 を考慮することのみを求めており、以後の同様な確率論的検討においてもこの判断を改めるには至らなかった。これらの検討では、いずれも外部電源の故障と内部電源の故障は独立な事象であると仮定しており、今般の事故のように設計上の想定を超える自然災害によって外部電源と内部電源が共通的に故障する事態は想定していない。

過去の安全審査においては、“短時間”を 30 分間と解釈する審査慣行の根拠や、長時間の SB0 の考慮が不要とされていることの根拠について、繰り返し質問されているが、この審査慣行や指針の妥当性が強く疑問視されるには至らなかった。

2. これまでの SB0 事象に対する安全確保の考え方

発電用軽水型原子炉施設における SB0 とは、全ての常用及び非常用交流母線の電圧が喪失した状態であって、母線への電力供給の完全喪失、または電力供給の喪失と母線の故障の重畳によって起こりうる。このような事態を防止するため、母線への電力供給は多重化されており、特に非常用母線については、多重化された外部電源からの受電に失敗した場合でも所内非常用電源（ディーゼル発電機）から必要な電力を受電することができる。また、常用及び非常用交流母線は、故障の影響が及ぶ範囲を限定できるよう分割されている。

全交流電源が喪失すると、電動機駆動のポンプ、弁、制御用空気圧縮機やヒータなどの動力用交流電源を必要とするものは不作動となる。しかし、このような状態でも、所内直流電源（蓄電池）によって原子炉を安全に停止し、さらに動力用の交流電源を必要としない系統、機器の作動を制御することにより、原子炉の冷却をある時間にわたって継続することが可能となるよう設計されている。

原子炉施設の安全確保は、多重防護の考え方に基づいており、SB0 に関しても、設計、建設、運転管理の各段階において、電源系統の信頼性を高め、内的・外的起因事象による電源系統の故障を防止し、これによって SB0 の発生を防止することから、継続的な SB0 に対処するためのアクシデントマネジメント（以下「AM」という。）策の整備まで、多層的な配慮がなされていた。

しかしながら、今般の事故で明らかになったことは、これまでの安全確保のアプローチに、方法上の弱点や、不徹底な部分があり、福島第一原子力発電所の有していた潜在的脆弱性を発見し、排除することができなかったということである。ここでは、設計上の想定を大きく超える外的起因事象（地震、津波）

による SB0 の発生の可能性についての知見⁴や、長時間の SB0 によるシビアアクシデント事象進展についての知見⁵、関係する国内外の事故故障情報等⁶が、安全設計審査指針を含む設計、建設、運転管理段階での安全確保策ならびに AM 策に適時かつ十全に反映されなかったことの影響が大きい。

3. 今後の SB0 事象対策の基本的な考え方

福島第一原子力発電所 1～3 号機では、設計基準を超える地震と津波によって SB0 に陥り、この状態が長時間継続したことによって大規模な炉心損傷に至った。この事故から得られた教訓を踏まえ、今後、発電用軽水型原子炉施設においては、適切な設計、建設、運転管理、シビアアクシデント防止策、影響緩和策によって、以下のような多重防護の観点からの要件を満たすことが求められる。

- (1) SB0 の発生確率をきわめて低いものとする。
- (2) SB0 が発生した際には、原子炉を安全に停止し、一定の時間にわたって停止後の冷却を確保し、かつ復旧できること。
- (3) SB0 の下で炉心の損傷に至った場合においても、環境への放射性物質の放出を十分に低く制限するための措置が可能であること。

停止後の冷却を確保するとは、原子炉 1 次系及び格納容器がそれぞれの最高使用圧力、最高使用温度を超えることがなく、それぞれのバウンダリが健全性を維持し⁷、炉心が冠水状態を維持し、使用済燃料プール温度が飽和温度以下を維持していることを意味する。

復旧できるとは、当該原子炉施設を冷温停止に移行し安定に維持できることならびに使用済燃料プール温度を最高使用温度以下に安定に維持できることを意味する。

一定の時間とは、SB0 の発生可能性が否定できないような状況において、所要の交流電源の復旧ならびに原子炉施設を安定的に冷温停止に至らしめるために必要な資源と態勢を確保するために十分な時間を意味する。

SB0 の発生可能性が否定できないような状況とは、大規模な自然事象を含め、原子炉施設内外における広範な災害を伴う状況を意味する。

4. SB0 対策に係る要件

これまで、設計、建設、運転管理によって SB0 の発生を防止することから、長時間の SB0 に対処するための AM 策の整備まで、多層的な配慮がなされていたに

⁴ たとえば、「地震に係る確率論的安全評価手法の改良：BWR の事故シーケンスの試解析」(独)原子力安全基盤機構、JNES/SAE08-006 平成 20 年 8 月

⁵ たとえば、“Analysis of Long-Term Station Blackout without Automatic Depressurization at Peach Bottom Using MELCOR (Version 1.8)” NUREG/CR-5850, 1994 年 5 月

⁶ たとえば、NRC INFORMATION NOTICE 2005-30: SAFE SHUTDOWN POTENTIALLY CHALLENGED BY UNANALYZED INTERNAL FLOODING EVENTS AND INADEQUATE DESIGN, November 7, 2005

⁷ たとえば、1 次系ポンプにおいて有意な漏えいが生じないこと。

もかかわらず今般の事故に至ったことを踏まえ、以下においては、基本設計に係る安全設計審査指針の改訂だけでなく、詳細設計、運転管理、シビアアクシデント防止・影響緩和策のあり方についても言及することとする。

4. 1 基本設計に係る要件

指針 27「電源喪失に関する設計上の考慮」は、3. で示した要件(2)「SB0が発生した際には、原子炉を安全に停止し、一定の時間にわたって停止後の冷却を確保し、かつ復旧できること。」とおおまかに対応する内容を要求していたものと理解される。このため、SB0 への対処の考え方としては、指針 27 については、「短時間の」との限定を削除するとともに解説により詳細設計以降の段階において、これを実現するための具体的要求を示す、又は安全設計審査指針から指針 27 を削除し、これに替わるより実効的な要求を課すことが適切であると判断する。

次に、3. で示した要件(1)「SB0 の発生確率をきわめて低いものとする。」に対応するため、安全設計審査指針の指針 48「電気系統」を以下のように改訂する。

指針48. 電気系統

1. 重要度の特に高い安全機能を有する構築物、系統及び機器が、その機能を達成するために電源を必要とする場合においては、外部電源又は非常用所内電源のいずれからも電力の供給を受けられる設計であること。
2. 外部電源系は、物理的に独立し、異なる電力系統に接続された 2 回線を含む送電線により電力系統に接続された設計であること。
3. 非常用所内電源系は、多重性又は多様性及び独立性を有し、その系統を構成する機器の単一故障を仮定しても次の各号に掲げる事項を確実にを行うのに十分な容量及び機能を有する設計であること。
 - (1) 運転時の異常な過渡変化時において、燃料の許容設計限界及び原子炉冷却材圧力バウンダリの設計条件を超えることなく原子炉を停止し、冷却すること。
 - (2) 原子炉冷却材喪失等の事故時の炉心冷却を行い、かつ、原子炉格納容器の健全性並びにその他の所要の系統及び機器の安全機能を確保すること。
4. 主発電機、電力系統、非常用所内電源設備それぞれからの電力供給の喪失によってそれ以外からの電力供給に支障を来す可能性、ならびにこれら全てからの電力供給が同時に喪失する可能性がきわめて低いこと。
5. 他の原子炉施設と電気系統の一部を共用する場合、他の原子炉施設の状態によらず、また他の原子炉施設の安全機能に悪影響を与えることがないこと。非常用所内電源系の共用は行わないこと。
6. 重要度の高い安全機能に関連する電気系統は、系統の重要な部分の適切な定期的試験及び検査が可能な設計であること。

(解説)

指針48. 電気系統

「外部電源系」とは、外部電源（電力系統）又は主発電機からの電力を原子炉施設に供給するための一連の設備をいう。

「非常用所内電源系」とは、非常用所内電源設備（非常用ディーゼル発電機、バッテリー等）及び工学的安全施設を含む重要度の特に高い安全機能を有する設備への電力供給設備（非常用母線スイッチギヤ、ケーブル等）をいう。

「重要度の特に高い安全機能」及び「重要度の高い安全機能」については、別に「重要度分類指針」において定める。

さらに、電気系統については、以下を基本設計における要件とする。本要件は、原子炉施設の設計上の想定を超える条件に関するものであるため、安全設計審査指針の枠外とする。

原子炉施設の設計上の想定を超える自然現象等に対して最小限の安全機能を維持する上で、電気系統の機能喪失が明らかな決定要因となることがないように設計されなければならない。

4. 2 詳細設計に係る要件（事業者への要求と行政庁への要求が区別されていない）

（1）代替電源

安全設計審査指針 48 において非常用所内電源系に多重性又は多様性及び独立性を要求するが、多様性については、別紙 1 にその要件を示す代替電源を含めて満足することを認める。

（2）電源設計審査基準の策定

原子力安全・保安院においては、外部電源、外部電源系、常用所内電源系ならびに非常用所内電源系の設計に関する審査基準を策定し、安全設計審査指針 48 のその他の要求を満足することを確認することを求める。審査基準は、外部事象ならびに内部溢水、火災等による電源系の損傷防止に係る基準、原子炉施設の多重防護を達成する上で必要な電源系の性能評価に係る基準を含むものとする。

（3）SB0 時の原子炉冷却系の性能確認

現行設計において、SB0 時に原子炉冷却を維持するためにその機能を期待している系統、すなわち動力用交流電源を必要とせず所内非常用直流電源によって制御可能な系統について、3. で示した要件（2）（停止後の冷却確保）との関わりにおいて、長時間の SB0 時の性能が詳細にわたって確認されること。ここでは、今般の事故の経緯の詳細な分析を参考とし、直流電源の枯渇や故障によって電圧が低下したときのこれらの系統の挙動や、電圧が復帰したときの挙動についても把握されること。

このようにして、いわゆる本設の系統やこれに係る運転手順と、4. 4で触れるシビアアクシデント防止のための対策とが、間隙のない多重防護の関係を構成することを確認すること。

なお、代替電源等、原子炉施設の最小限の安全機能を維持するために必須の設備の位置、接近方法等の情報については、セキュリティの観点から、適切な保護をはかること。

4. 3 運転管理に係る要件

運転管理段階における電源や原子炉冷却系に係る LCO（運転上の制限）、AOT（許容待機除外時間）等の設定は、3. で示した基本的要求に整合し、SB0 によるリスクの抑制に有効なものであること。

SB0 によるリスクの抑制のため、国内外の事故故障情報を適時に分析し反映をはかること。

4. 4 シビアアクシデントの防止策ならびに影響緩和策について

今後のシビアアクシデント対策については、原子力安全委員会において基本的な考え方が提示される見通しであるが、今般の事故の経緯を詳細に分析することによって、SB0 時に特徴的な課題を早急に抽出し、また関連の研究の成果を活用し、対策への反映をはかるべきである。

シビアアクシデントの防止策については、3. で示した要件（2）「SB0 が発生した際には、原子炉を安全に停止し、一定の時間にわたって停止後の冷却を確保し、かつ復旧できること。」を満足するために、長時間の SB0 時に特有の制約、すなわち制御用の直流電圧の消失や、制御用の圧縮空気圧の消失、これらに伴う弁類の開閉や、その状態把握の困難等が把握され、考慮される必要がある。

シビアアクシデントの影響緩和策については、3. で示した要件（3）「SB0 の下で炉心の損傷に至った場合においても、環境への放射性物質の放出を十分に低く制限するための措置が可能であること。」を満足するために、長時間の SB0 時に特有の制約として、上記に加え、SB0 下で炉心損傷が発生したときの、原子炉建屋（BWR）やアニュラス部（PWR）における水素爆発のリスク、放射線量率や放射能濃度の上昇による作業の困難等が考慮される必要がある。

4. 5 SB0 時の耐久時間評価

個別プラントの SB0 対処策の性能評価の一環として、耐久時間が評価されるべきである。ここでは、長時間の SB0（外部電源喪失＋所内常用電源及び所内非常用電源の喪失）が生じた場合を想定し、以下の場合について、炉心の冷却ならびに格納容器の過圧防止を維持できる時間を評価するものとする。

(i) 代替交流電源が使用可能である場合。

- (ii) 代替交流電源が使用不可であり、直流電源のみが使用可能である場合。
- (iii) 代替(後備)直流電源の使用や、再充電が可能である場合。

これらの評価においては、耐久時間の確保のためにクリティカルとなる設備や運転手順を同定すること。なお、詳細設計および運転管理においては、これらの実効性及び信頼性を担保する手段がリスク上の重要度にふさわしいものであることが必要である。

4. 6 原子炉施設の設計上の想定を超える外部事象への対処能力の評価

原子炉施設の、設計上の想定を超える自然現象や、多重故障事象への対処能力を把握することは、今後の安全確保、安全性向上のために重要である。原子力安全委員会は、そのような観点から、発電用原子炉施設の安全性の総合的な評価を行うことを原子力安全・保安院に対して求めている⁸。ここでは、決定論的な手法をとりつつも、これまでの内的事象 PSA、地震・津波 PSA 等の知見を活用することを求めている。このような評価は、今般の事故で顕在化したような原子炉施設の潜在的脆弱性を発見し、排除するために有用な手段であると考えられ、今後、継続的に実施されるべきである。

安全設計審査指針やその適用を含め、安全確保のための方法や手段は、その妥当性について絶えず問い直すことが重要であり⁹、そのための有効な手段の一つとして、決定論的及び確率論的な安全評価の手法が継続的に改良される必要がある。

⁸ 「東京電力株式会社福島第一原子力発電所における事故を踏まえた既設の発電用原子炉施設の安全性に関する総合的評価実について」(平成 23 年 7 月 6 日原子力安全委員会決定)

⁹ 「原子力安全委員会の当面の施策の基本方針について」(平成 22 年 12 月 2 日原子力安全委員会決定)においても、リスクの抑制水準を把握することなどによって、合理的に実行可能な限りの安全性の向上努力を継続すべきとしている。

平成 23 年 8 月 8 日

安全設計審査指針「指針 27」に関する検討

日本原子力研究開発機構
安全研究センター
渡邊

1. 背景

安全設計審査指針の基本的な考え方は、指針 9 の第 3 項にあるように、「単一故障を想定した場合において所定の安全機能を達成し原子炉施設の安全性が確保されるよう設計する」ことを求めているものと解釈できる。一方、指針 27 では、「原子炉施設は、短時間の全交流動力電源喪失に対して、原子炉を安全に停止し、かつ、停止後の冷却を確保できる設計であること」を要求しているが、「短時間の全交流動力電源喪失」は、いわば多重故障の結果として起こるものであり、単一の故障を想定した場合に対する他の指針との整合が取れていない。従って、指針 27 を安全設計審査指針から外して、別途要求すべきものとして整備することが適切であると考ええる。

以下では、全交流動力電源の喪失に係る基本的な要求（性能要求）とその要求に関する説明を「解説」としてまとめる。併せて、この要求の指針体系の中での位置付けについても言及する。

2. 基本的な要求事項

全交流動力電源が喪失した場合において、代替の交流電源装置（代替電源）により炉心の冷却と格納容器の健全性を確保し原子炉を冷温停止に移行し維持するとともに、使用済み燃料プールの冷却を行うことができるよう設計する。この代替電源には、必要に応じて、専用のバッテリー（無停電電源装置）や電源盤などを備えるものとし、また、自立した設備構成でなければならない。さらに、代替電源は、地震や浸水などの自然現象の発生時において所定の機能を果たすことができるよう設計、配置しなければならない。

3. 解説

代替電源については、全交流動力電源喪失の原因として、内部の共通原因故障に加え、地震や浸水、台風などの自然現象を考慮し、これまでの運転経験を基に、外部電源喪失の頻度や継続時間、非常用電源設備の信頼性をプラントサイトごとに評価を行い、その評価結果に基づいて、全交流動力電源喪失に対処するに十分な能力（容量や作動継続時間など）を決める必要がある。

「自立した設備構成」とは、代替電源専用の燃料供給設備や制御設備などの付属設備を備えたものとし、他の系統から独立した設備構成であることを言う。

代替電源の原子炉間での共用は原則禁止することとし、各原子炉に対して備えるものとする。ただし、各々の原子炉における非常用電源設備の構成（非常用電源設

備の多重性が高い場合、例えば、高圧スプレー系専用のディーゼル発電機を有する BWR) やサイトでの外部電源喪失の頻度、想定される自然現象による全交流動力電源喪失の発生可能性などを考慮することで原子炉間共用もできるものとする。

代替電源は、地震や浸水時に所定の機能を果たすことができるよう特に重要度の高い安全機能を有する構築物、系統及び機器と同等の設計、配置構成とする必要がある。また、非常用電源とは異なり特に重要度の高い安全機能を有する構築物、系統及び機器として管理する必要はないものの、その信頼性を確保するために、定期的な点検や試験を行うなど十分な品質管理を行うものとする。

4. 指針体系の中での位置付け

現在の指針体系は、設計基準を超えない範囲を対象としており、単一故障を想定した基本設計に対する要求と言える。指針 27 は、短時間ではあるものの設計基準を超える場合についての要求であるため、安全設計審査指針から外して、別途、要求を課すことが妥当であると考ええる。しかし、指針 27 に限らず、今後は、シビアアクシデントへの対応を踏まえた設計要求を課すことが不可欠であり、それらと併せて、指針 27 に代わる要求の指針化を図っていくべきものと考ええる。

参考：米国の全交流電源喪失(SBO)規則（10 CFR 50.63）との比較

米国の SBO 規則では、SBO の継続時間を、(1)所内非常用交流電源の多重性、(2)所内非常用交流電源の信頼性、(3)外部電源喪失に関して予想される発生頻度、(4)外部電源を復旧するために必要な時間に基づくことを前提として、各軽水炉はその継続時間に耐え復旧できなければならないとしている。また、所内バッテリーや他の必要なサポート系を含め炉心及び関連する冷却材系、制御系、保護系により、SBO が起こった場合の所定の期間において、炉心を冷却し格納容器の健全性を維持するために十分な容量と機能を備えなければならないとしており、必ずしも SBO 用に新たな電源（代替交流電源）を設けるよう求めているわけではない。そのため、サイトによっては、SBO 用の電源を有していない。一方、同規則においては、所内非常用交流電源を号機間で共用していないサイトにおける代替交流電源に対し、1 基の原子炉の SBO に対処するための容量と能力を持たせること、また、所内非常用交流電源を号機間で共用するサイトにおける代替電源に対し、全ての原子炉を安全停止に移行、維持できることを担保するために必要な容量と能力を持たせることを求めている。

これに対して、上記案は、代替電源の追加設置を要求するものとなっており、米国 SBO 規則とは意を異にするものである。これは、福島第一原子力発電所（1F 発電所）において津波により SBO が発生し復旧にも時間がかかったことを受けたものである。また、1F 発電所において電源盤とバッテリーが水没し使用できなくなったことに鑑み、上記案で求める代替電源は、単に交流電源だけでなく、電源盤やバッテリーも必要に応じて備えることを求めるものとしている。

安全重要度分類

(原子力安全委員会「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」より)

○異常発生防止系(PS)

その機能の喪失により、原子炉施設を異常状態に陥れ、もって一般公衆ないし従事者に過度の放射線被ばくを及ぼすおそれのあるもの。

○異常影響緩和系(MS)

原子炉施設の異常状態において、この拡大を防止し、又はこれを速やかに収束せしめ、もって一般公衆ないし従事者に及ぼすおそれのある過度の放射線被ばくを防止し、又は緩和する機能を有するもの。

□信頼性要求

クラス1:合理的に達成し得る最高度の信頼性を確保し、かつ、維持すること。

クラス2:高度の信頼性を確保し、かつ、維持すること。

クラス3:一般の産業施設と同等以上の信頼性を確保し、かつ、維持すること。

第1表 安全上の機能別重要度分類

機能による分類		安全機能を有する構築物、系統及び機器		安全機能を有しない構築物、系統及び機器
重要度による分類		異常の発生防止の機能を有するもの(PS)	異常の影響緩和の機能を有するもの(MS)	
安全に関連する構築物、系統及び機器	クラス 1	PS-1	MS-1	
	クラス 2	PS-2	MS-2	
	クラス 3	PS-3	MS-3	
安全に関連しない構築物、系統及び機器				安全機能以外の機能のみを行うもの

第2表 安全上の機能別重要度分類に係る定義及び機能

分	類	定	義	機	能
クラス1	PS-1		その損傷又は故障により発生する事象によって、 (a) 炉心の著しい損傷、又は (b) 燃料の大量の破損を引き起こすおそれのある構築物、系統及び機器	1) 原子炉冷却材圧力バウンダリ機能	
				2) 過剰反応度の印加防止機能	
				3) 炉心形状の維持機能	
	MS-1		1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し、残留熱を除去し、原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し、敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物、系統及び機器	1) 原子炉の緊急停止機能	
				2) 未臨界維持機能	
				3) 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	
				4) 原子炉停止後の除熱機能	
				5) 炉心冷却機能	
				6) 放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮へい及び放出低減機能	
			2) 安全上必須なその他の構築物、系統及び機器	1) 工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能	
				2) 安全上特に重要な関連機能	

分	類	定	義	機	能
クラス2	P S - 2	1) その損傷又は故障により発生する事象によって、炉心の著しい損傷又は燃料の大量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが、敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構築物、系統及び機器		1) 原子炉冷却材を内蔵する機能 (ただし、原子炉冷却材圧力バウンダリから除外されている計装等の小口径のもの及びバウンダリに直接接続されていないものは除く。)	
				2) 原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていないものであって、放射性物質を貯蔵する機能	
				3) 燃料を安全に取り扱う機能	
		2) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に作動を要求されるものであって、その故障により、炉心冷却が損なわれる可能性の高い構築物、系統及び機器		1) 安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	
	M S - 2	1) P S - 2 の構築物、系統及び機器の損傷又は故障により敷地周辺公衆に与える放射線の影響を十分小さくするようにする構築物、系統及び機器		1) 燃料プール水の補給機能	
				2) 放射性物質放出の防止機能	
		2) 異常状態への対応上特に重要な構築物、系統及び機器		1) 事故時のプラント状態の把握機能	
クラス3	P S - 3	1) 異常状態の起因事象となるものであって、P S - 1 及び P S - 2 以外の構築物、系統及び機器		2) 異常状態の緩和機能	
				3) 制御室外からの安全停止機能	
				1) 原子炉冷却材保持機能 (P S - 1、P S - 2 以外のもの。)	
				2) 原子炉冷却材の循環機能	
				3) 放射性物質の貯蔵機能	
				4) 電源供給機能 (非常用を除く。)	
	M S - 3	2) 原子炉冷却材中放射性物質濃度を通常運転に支障のない程度に低く抑える構築物、系統及び機器		5) プラント計測・制御機能 (安全保護機能を除く。)	
				6) プラント運転補助機能	
				1) 核分裂生成物の原子炉冷却材中への放散防止機能	
				2) 原子炉冷却材の浄化機能	
				1) 原子炉圧力の上昇の緩和機能	
				2) 出力上昇の抑制機能	
		2) 異常状態への対応上必要な構築物、系統及び機器		3) 原子炉冷却材の補給機能	
				緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握機能	

付表:PWR 及び BWR の安全上の機能別重要度分類の例(抜粋)

分 類	異 常 発 生 防 止 系						
	定 義	機 能	構築物、系統又は機器 (PWR)	特記すべき関連系 (PWR)	構築物、系統又は機器 (BWR)	特記すべき関連系 (BWR)	備 考
<u>PS-3</u>	1) 異常状態の起因事象となるものであって、PS-1 及び PS-2 以外の構築物、系統及び機器	1) 原子炉冷却材保持機能 (PS-1、PS-2 以外のもの)	計装配管、試料採取管		計装配管、試料採取管		注3) 現状では、液体及び固体の放射性廃棄物処理系が考えられる。
		2) 原子炉冷却材の循環機能	1 次冷却材ポンプ及びその関連系		原子炉冷却材再循環系		
		3) 放射性物質の貯蔵機能	放射性廃棄物処理施設 (放射能インベントリの小さいもの) 注3)		サブプレッションプール水排水系、復水貯蔵タンク、放射性廃棄物処理施設 (放射能インベントリの小さいもの) 注3)		
		4) 電源供給機能 (非常用を除く。)	主蒸気系 (隔離弁以後)、給水系 (隔離弁以前)、 送電線、変圧器、開閉所		タービン、発電機及びその励磁装置、復水系 (復水器を含む。)、給水系、循環水系、送電線、変圧器、開閉所		

耐震設計上の重要度分類

(原子力安全委員会「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」より)

(1) 機能上の分類

Sクラス……自ら放射性物質を内蔵しているか又は内蔵している施設に直接関係しており、その機能喪失により放射性物質を外部に放散する可能性のあるもの、及びこれらの事態を防止するために必要なもの、並びにこれらの事故発生の際に外部に放散される放射性物質による影響を低減させるために必要なものであって、その影響の大きいもの

Bクラス……上記において、影響が比較的小さいもの

Cクラス……Sクラス、Bクラス以外であって、一般産業施設と同等の安全性を保持すればよいもの

(2) クラス別施設

① Sクラスの施設

- i) 「原子炉冷却材圧力バウンダリ」(軽水炉についての安全設計に関する審査指針において記載されている定義に同じ。)を構成する機器・配管系
- ii) 使用済燃料を貯蔵するための施設
- iii) 原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設、及び原子炉の停止状態を維持するための施設
- iv) 原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための施設
- v) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するための施設
- vi) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に、圧力障壁となり放射性物質の放散を直接防ぐための施設
- vii) 放射性物質の放出を伴うような事故の際に、その外部放散を抑制するための施設で上記vi)以外の施設

② Bクラスの施設

- i) 原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていて、一次冷却材を内蔵しているか又は内蔵する施設
- ii) 放射性廃棄物を内蔵している施設。ただし、内蔵量が少ないか又は貯蔵方式により、その破損による公衆に与える放射線の影響が周辺監視区域外における年間の線量限度に比べ十分小さいものは除く。
- iii) 放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で、その破損により、公衆及び従事者に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設
- iv) 使用済燃料を冷却するための施設
- v) 放射性物質の放出を伴うような場合に、その外部放散を抑制するための施設で、Sクラスに属さない施設

③ Cクラスの施設

上記Sクラス、Bクラスに属さない施設