

LCO適正化の検討における使用済燃料プール水位低下時の評価について

2021年6月9日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

- 本資料は、2021年4月12日面談資料「1FにおけるLCO適正化の検討状況」に記載しているSFP水位低下時の線量率評価および燃料集合体の温度評価について、評価モデルおよび評価条件等の補足説明をすることを目的とする。

- 今回説明する評価は以下の通り。
 - 線量率評価
 - 1～6号機および共用プールの線量率を概算評価。

 - 燃料集合体温度評価
 - ① プール水完全水抜け時の自然対流による空冷効果が期待できる場合
 - ② プール水位が燃料有効底部(BAF) となり、空冷効果が期待できない場合（中間水位）
 - 1号機, 6号機, 共用プールを代表号機として評価。
 - 2号機, 5号機は, 崩壊熱が同程度であるため1号機, 6号機を代表とする。

2. 1 線量率評価

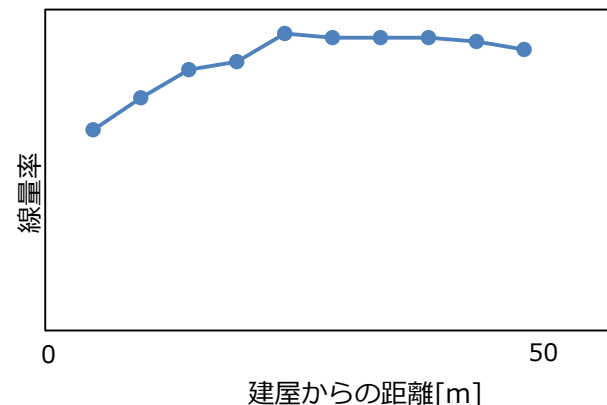
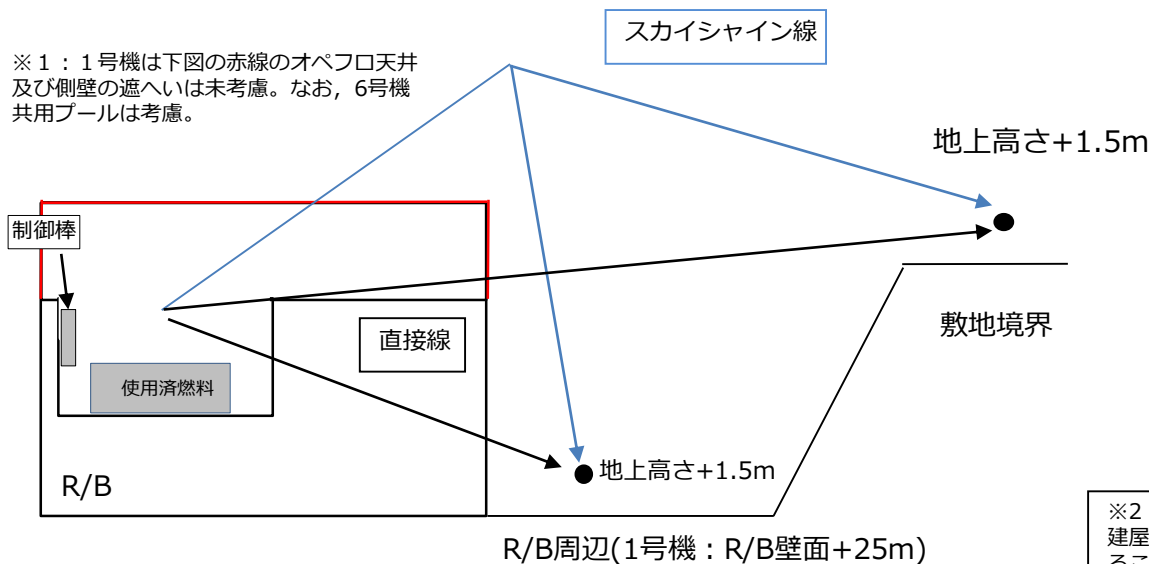
<評価概要>

- 使用済燃料プールからのスカイシャイン線、直接線による線量率を評価。

<評価条件>

- 現状を考慮して1号機はオペフロの天井及び側壁による遮へいは未考慮※1。
なお、オペフロ階下の建屋遮へいは考慮。
- 6号機及び共用プールは、建屋が健全であるため建屋遮へいを考慮する。
- 1号機はオペフロの天井及び側壁を未考慮。
- 線源：使用済燃料（燃料有効部）、ハンガーラックに保管された制御棒（Co-60）
- 放出点：SFP中心
- 評価点：建屋周辺：建屋周辺の中で線量率が高い距離。（5m毎で建屋周辺の線量率を算出）
敷地境界：各SFP中心からの距離が最も短い地点。

※1：1号機は下図の赤線のオペフロ天井及び側壁の遮へいは未考慮。なお、6号機共用プールは考慮。



建屋周辺の線量率のイメージ※2

※2：屋外はスカイシャイン線の寄与が支配的である。しかしながら、建屋近傍では建屋が影となりスカイシャイン線の一部を建屋が遮へいすることから、スカイシャイン線の影響は限定的。そのため、ある程度建屋から離れた方が線量率が高い。

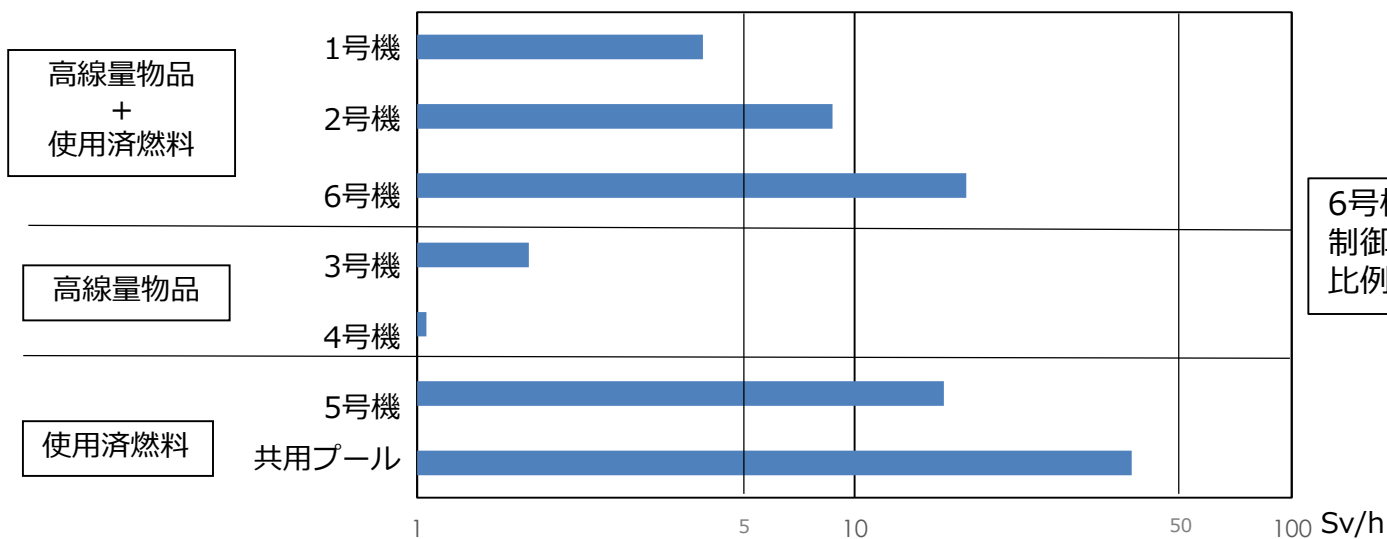
2. 2 線源強度の条件

		1号機	6号機	共用	備考
使用済燃料	種類	高燃焼度8×8型	9×9 (B) 型	9×9 (A) 型	最大燃焼度の燃料集合体の種類
	燃焼度 [GWd/t]	43	51	51	平均燃焼度の最大値
	冷却期間[年]	10.4	10.0	9.7	2020.8.1時点
	貯蔵体数[体]	292	1456	6295 (貯蔵率 92.6%)	SFPに貯蔵されている使用済燃料(未照射燃料除く) (2020.8.1時点)
使用済制御棒 (ボロン・ カーバイト 型)	照射条件[snvt]	1.3	無	無	照射実績より保守的に設定
	冷却期間[年]	10			2020.8.1時点
	貯蔵体数[体]	17			ハンガーラックに保管された制御棒 (2020.8.1時点)
使用済制御棒 (ハフニウム 型)	照射条件[snvt]	1.6	4.9		照射実績より保守的に設定
	冷却期間[年]	18.3	13.8		2020.8.1時点
	貯蔵体数[体]	4	27		ハンガーラックに保管された制御棒 (2020.8.1時点)

2. 3 BAF時の線量率評価結果

- 建屋周辺の線量率は、最大で1号機の約 4.6×10^3 [$\mu\text{Sv/h}$]である。
- 敷地境界の線量率は、最大で6号機の約 5.5×10^{-1} [$\mu\text{Sv/h}$]である。
- 各号機のSFP周辺の線量率の概算値を下記に示す。

	建屋周辺		敷地境界	
	R/B壁面からの距離[m]	線量率 [$\mu\text{Sv/h}$]	SFP中心からの距離[m]	線量率 [$\mu\text{Sv/h}$]
1号機	約25	約 4.6×10^3	約940	約 5.3×10^{-1}
6号機	約40	約 1.0×10^3	約680	約 5.5×10^{-1}
共用プール	約20	約 6.2×10^2	約670	約 1.5×10^{-1}

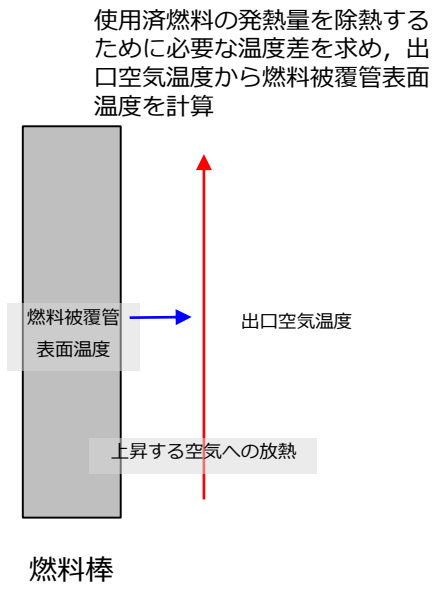
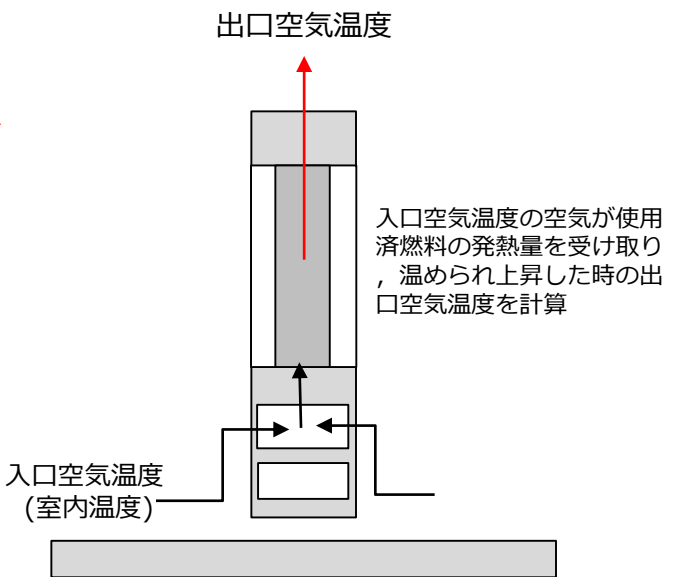
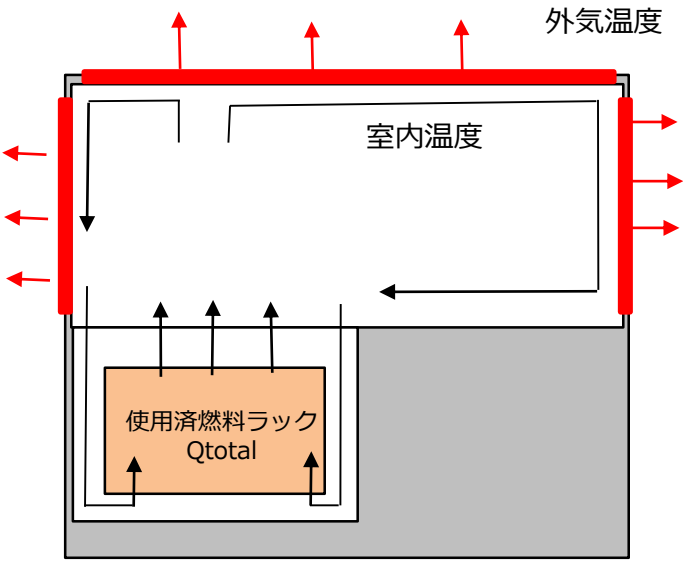


6号機の社内評価結果を元に、制御棒体数及び燃料体数で比例計算。

各号機のSFP周辺の線量率

<評価概要>

- プール水完全水抜け時の自然対流による空気冷却条件で燃料集合体（燃料被覆管表面）温度を評価。
- ① 燃料集合体総発熱量から室内温度を評価。
- ② ①で評価した室内温度の空気が最も発熱量が大きい燃料の下部から流入した際の燃料出口での出口空気温度を崩壊熱より評価。
- ③ ②で評価した出口空気温度とするために必要となる燃料集合体温度を評価。

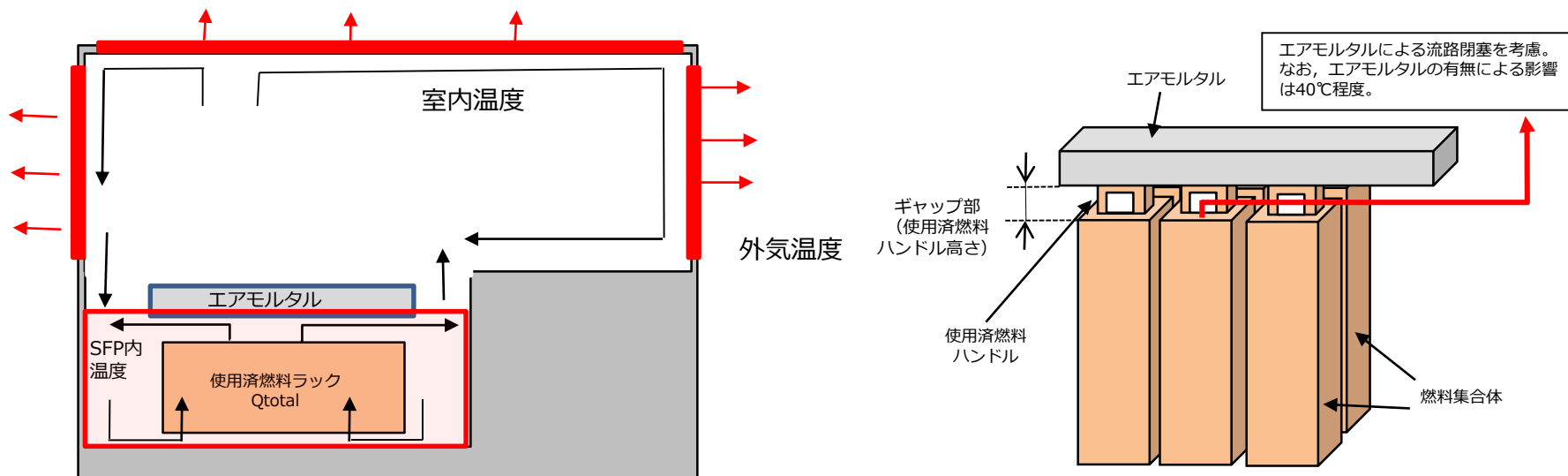


※ 1号機はプール内に設置している緩衝材（エアモルタル）が、完全水抜け時に空冷効果を低下させる条件を考慮

3. 1. 2 1号機完全水抜け時（空冷効果有）の燃料集合体の温度評価

<評価概要>

- SFP内への瓦礫落下による燃料損傷防止を目的に、1号機の使用済燃料プール表面には緩衝材（エアモルタル）をプール水面に養生している。（プール面積に対し80%程度カバー）
 - プール水が全喪失した際に、エアモルタルは使用済燃料に乗った状態を想定し、使用済燃料のハンドル高さ分のギャップがあると仮定。
 - 使用済燃料出口から出てきた空気は、エアモルタルに沿ってSFP-エアモルタルのギャップ部からオペフロへ出てくる循環流を想定。
- ① オペフロ（室内温度）とSFP内温度はSFP内温度の方が高くなることが想定されるため、それぞれを別領域として扱い、燃料集合体総発熱量に対する室内温度とSFP内温度が平衡状態となる温度を評価。
 - ② ①で評価したSFP内温度の空気が最も発熱量が大きい燃料の下部から流入した際の燃料出口での出口空気温度を崩壊熱より評価。
 - ③ ②で評価した出口空気温度とするために必要となる燃料集合体温度（燃料被覆管表面）を評価。



1号機特有のモデル

- 1号機，6号機，共用プールの発熱量及び最大となる使用済燃料の発熱量は以下の通り。

	1号機	6号機	共用	備考
燃料集合体総発熱量 [W]	5.3×10^4	3.0×10^5	1.1×10^6	プール内に保管されている燃料集合体の発熱量の総和。 (2020.8.1時点)
最大となる燃料集合体 の発熱量(W)	260	320	330	プール内に保管されている燃料集合体の内最大となる燃 料集合体の発熱量。(2020.8.1時点)
貯蔵体数[体]	292	1456	6295 (貯蔵率92.6%)	SFPに貯蔵されている使用済燃料(未照射燃料除く) (2020.8.1時点)
放熱箇所	建屋天井，建屋側壁			1号機は今後設置予定の建屋カバー(2020.8月時点での 設計)を考慮。

3. 1. 4 完全水抜け時（空冷効果有）の燃料集合体の温度評価結果

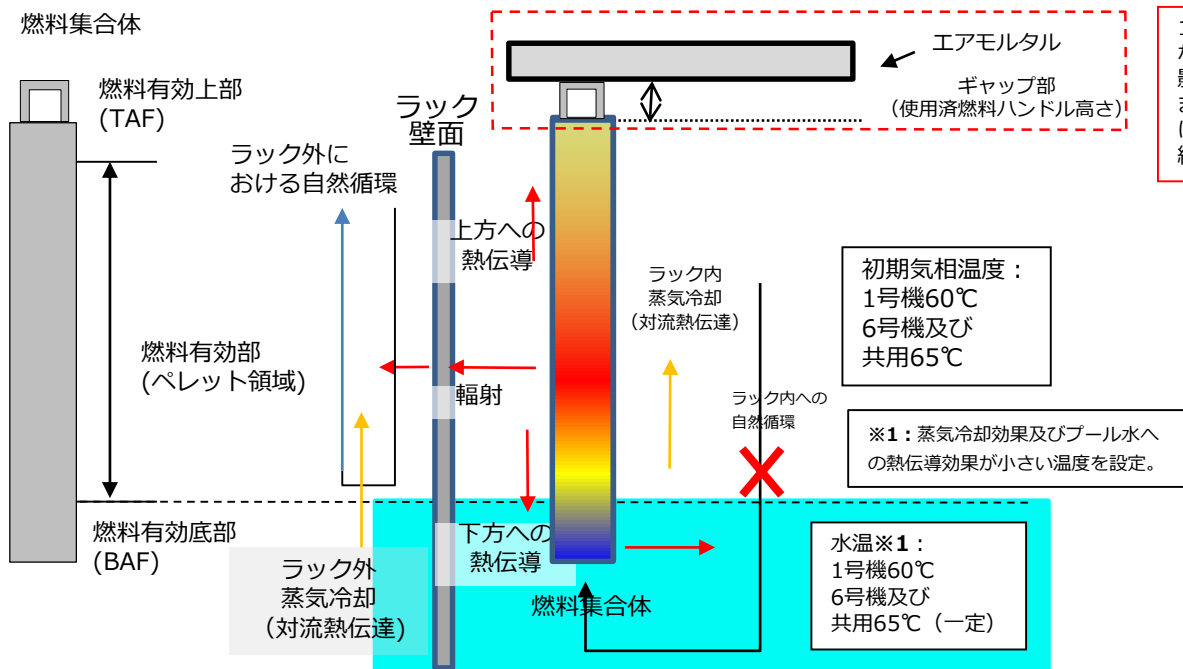
- 1号機, 6号機, 共用プールの完全水抜け時における燃料集合体温度は以下の通り。
- 燃料集合体温度は最高でも共用プールの310℃程度である。

	1号機 (モルタル有)	6号機	共用プール
燃料集合体温度[℃] (燃料被覆管表面温度)	約200	約220	約310

3. 2. 1 中間水位時（空冷効果無）の燃料集合体の温度評価

<評価概要>

- 最も厳しいSFP水位の条件として、SFP水位が燃料有効底部(BAF)付近において、空気冷却がない条件が継続した場合の燃料集合体（燃料被覆管表面）温度を評価。
- 1号機については、エアモルタルが使用済燃料に乗った状態を想定し、エアモルタルによる流路閉塞を考慮。
- 燃料集合体放熱条件：蒸気発生による蒸気冷却効果，燃料集合体燃料領域から上下方向への熱伝導，輻射，ラック外における自然循環及び蒸気冷却
- 放熱箇所：建屋天井，建屋側壁，プール床面，プール側壁，オペフロ床面
- SFP水位：BAF高さで水位一定と仮定



1号機では、エアモルタルによる流路閉塞を考慮した。なお、エアモルタルの有無による燃料集合体温度への影響はない。また、SFP内に堆積した瓦礫による流路閉塞については、本評価のプール水による流路閉塞の評価結果に包絡される。

初期気相温度：
1号機60℃
6号機及び
共用65℃

※1：蒸気冷却効果及びプール水への熱伝導効果が小さい温度を設定。

水温※1：
1号機60℃
6号機及び
共用65℃（一定）

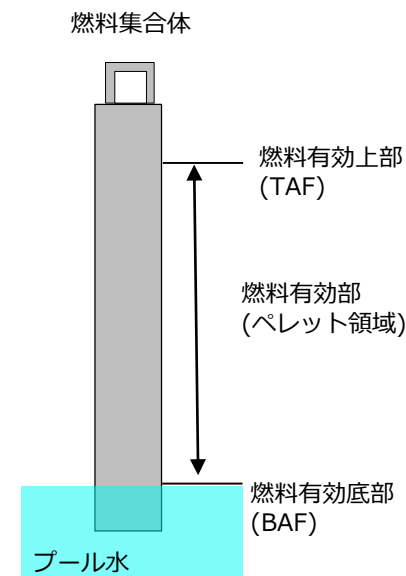
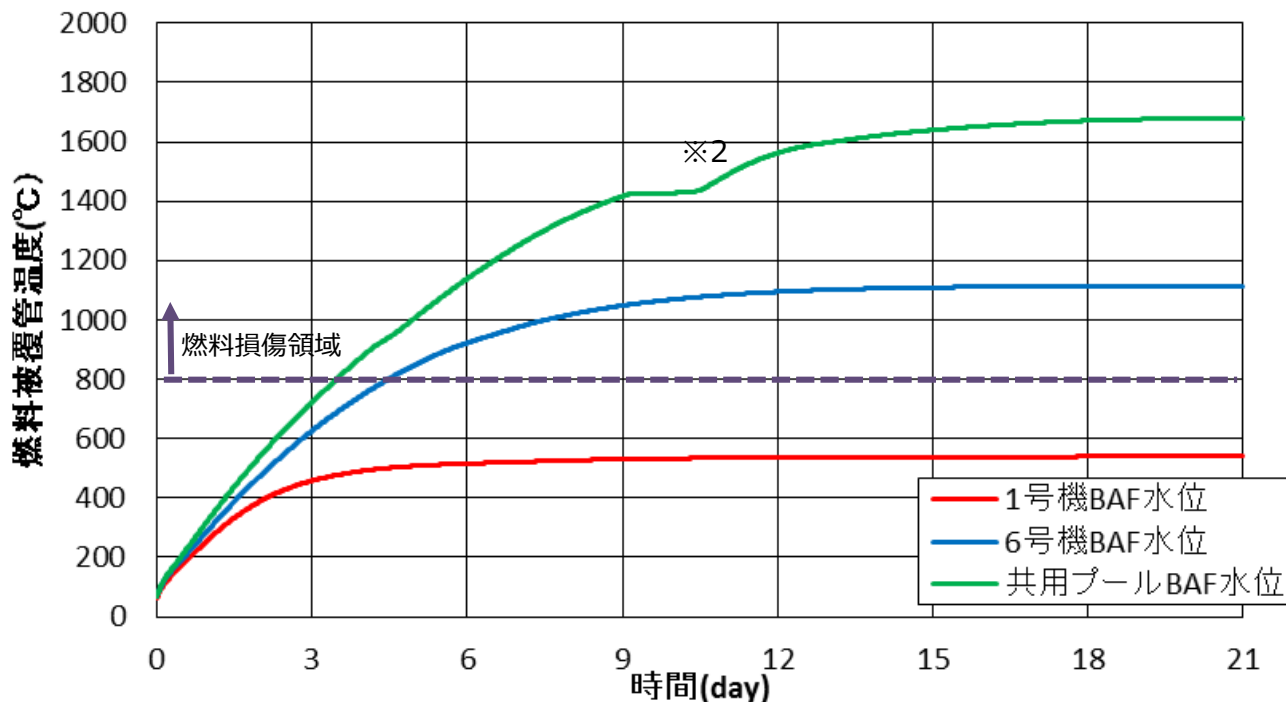
1号機，6号機，共用プール共通モデル

3. 2. 2 中間水位時（空冷効果無）の燃料集合体の温度評価条件

	1号機	6号機	共用	備考
種類	高燃焼度8×8型	9×9（B）型	9×9（B）型	最大発熱量の燃料の種類。
最大となる燃料集合体の発熱量(W)	260	320	330	プール内に保管されている燃料集合体の内最大となる燃料集合体の発熱量。(2020.8.1時点)
貯蔵体数[体]	292	1456	6295 (貯蔵率92.6%)	SFPに貯蔵されている使用済燃料(未照射燃料除く) (2020.8.1時点)
燃料配置	プール内の最大発熱量の燃料集合体が全ラック内に一律配置			簡易モデルとしてラックに最大発熱量の燃料集合体を一律配置。
軸方向出力分布	最大発熱量の集合体の軸方向出力分布を設定			運転期間中のものを設定。
燃料集合体放熱条件	蒸気発生による蒸気冷却効果，燃料集合体燃料領域から上下方向への熱伝導，輻射，ラック外における自然循環及び蒸気冷却			1号機はエアモルタルによる流路閉塞を考慮。
放熱箇所	建屋天井，建屋側壁，プール床面，プール側壁，オペフロ床面			
SFP水位	BAF高さで水位が一定と仮定			保守的に注水量及び漏えい量が一定となった状態と仮定。

3. 2. 3 中間水位時（空冷効果無）の燃料集合体の温度評価

- 1号機では、BAF時においても燃料集合体（燃料被覆管表面）温度は800℃未満※1であることから、燃料集合体は損傷しない。
- 6号機、共用プールではBAF水位時、燃料集合体（燃料被覆管表面）温度は800℃ ※1を超過することから、燃料集合体は損傷する。



BAF水位が継続時の温度評価

※1 燃料被覆管（ジルコニウム）は高温になると酸化反応を起こすことから800℃を目安とした。
※2 ラック破損

目的

- 福島第一原子力発電所（1F）においては、存在するリスクが顕在化しないよう、必要な安全機能を確保するために遵守すべき制限としてLCO※を設定。
- 一方、時間の経過による崩壊熱の低下や廃炉作業の進捗に伴い、事故直後と比較して1Fのリスクは低減され、全体的に安全性が向上してきている状況。
- 今後の廃炉を安全かつ着実に進めていくため、変化するリスクの状況に応じて必要とされる安全機能やLCOについて状況に応じた見直しを行い適正化をしていく。

※ LCO：運転上の制限（Limiting Conditions for Operation）

(参考) これまでの運転上の制限に係る見直し

- ▶ 過去の1～4号機の運転上の制限の見直しは、曖昧な規定を変更することを中心を実施。また、至近に行った1～3号機の運転上の制限の見直しでは、第81回特定原子力施設監視・評価検討会の議論を踏まえ、現在のプラント状況や試験結果より、安全評価の再評価を必要としない適正化を実施。
- ▶ 5/6号機については、設計基準事故に対する安全評価を行い、一部残っていた通常炉と同様の規定の見直しを実施。

■ 1～4号機 曖昧な規定の変更

- 建屋最下階の残水箇所への扱い方に関する変更
- セシウム吸着装置のCs/Sr同時吸着運転時における「1設備」の定義に関する変更等

■ 1～3号機 至近のプラント状況や試験結果を踏まえた適正化

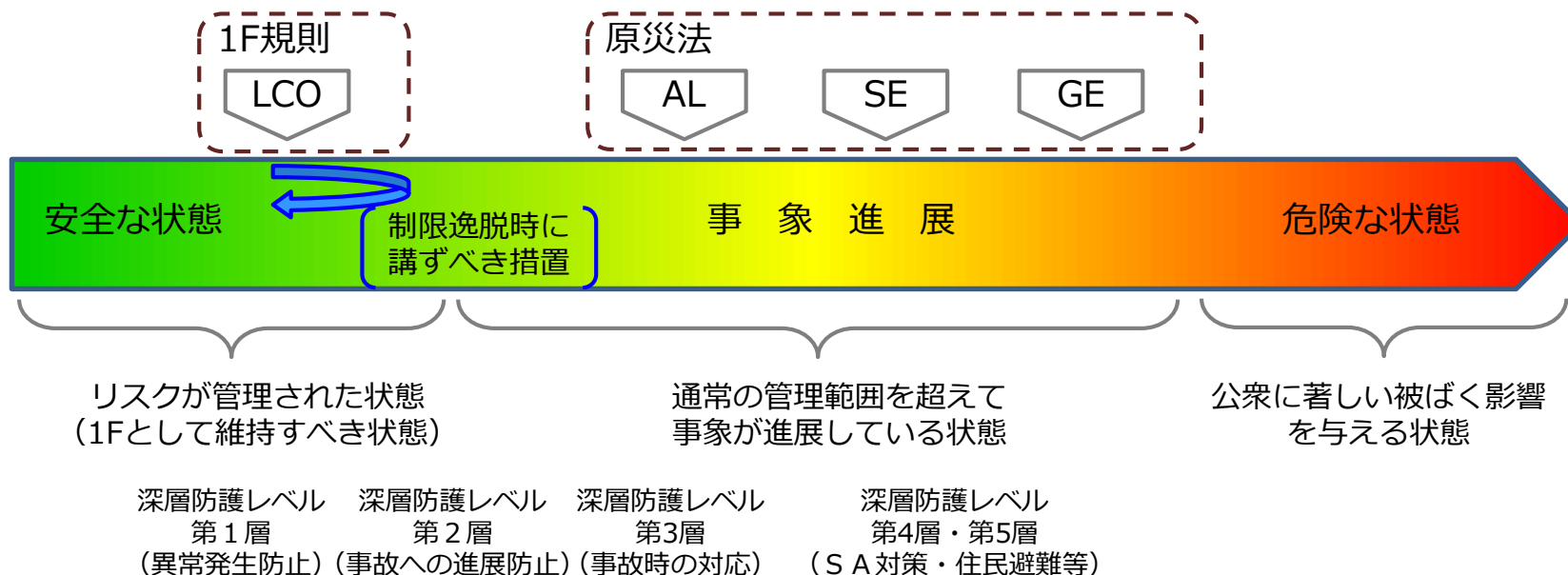
- 設備の状況や試験結果に基づき、原子炉注水系、非常用水源及び格納容器内の不活性雰囲気維持機能に係る運転上の制限について、現在のプラント状況に合わせることを目的とした見直しを実施

■ 5/6号機 照射された燃料作業に関わる機器への要求の除外

- 原子炉に燃料を装荷しないことを実施計画に明記
- 事故後の使用済燃料中放射能の減衰を踏まえた安全評価に基づき、非常用ガス処理系や中央制御室非常用換気空調系等に対する要求を除外するなどの見直しを実施

1Fにおける「運転上の制限」の位置づけ

- 現在の1Fにおいては、存在するリスクの顕在化を防止するため、必要な安全機能を確保するために遵守すべき制限として、運転上の制限（LCO）を設定し、仮に制限を逸脱した場合に講ずべき措置を定めるなど、適切な運転管理を実施している。
- また、各設備の運転管理以外にも、1Fの保安のために講ずべき事項（燃料管理、放射線管理、他）を定めるとともに、より重篤なリスクに備えた緊急時対応を定めている。
- ここで、1F規則第14条における「発電用原子炉施設の運転」とは、原子炉の運転に限らず、実施計画で定める安全確保設備等を運用することが含まれると解釈されるため、LCOの設定をはじめとした、適切な運転管理を行う必要がある。



1F廃炉におけるLCOの定義（案）

1F廃炉オペレーション^①における事故シナリオ^②に対し、公衆被ばく及び放射性物質の放出リスクが許容される状態^③にあることを示した制限をいう。

LCO逸脱事象が発生した場合には、リスクを低減するための措置^④を講じることにより、公衆被ばく及び放射性物質の放出リスクの管理を行う。

① 1F廃炉オペレーション

原子力ハザード（燃料デブリ、使用済燃料、汚染水、放射性廃棄物）に対する運転・設備管理及びリスク低減のための作業管理

② 事故シナリオ

事故のきっかけとなる事象を出発点として、検知設備・異常時対応設備の状態、人的対応の可否等を含む一連の異常時対応の流れをいい、事故の影響度が小さいものを含む

③ 公衆被ばく及び放射性物質の放出リスクが許容される状態

安全評価の結果、公衆被ばく及び放射性物質の放出リスクが十分低減されていると判断された前提条件を満足する状態

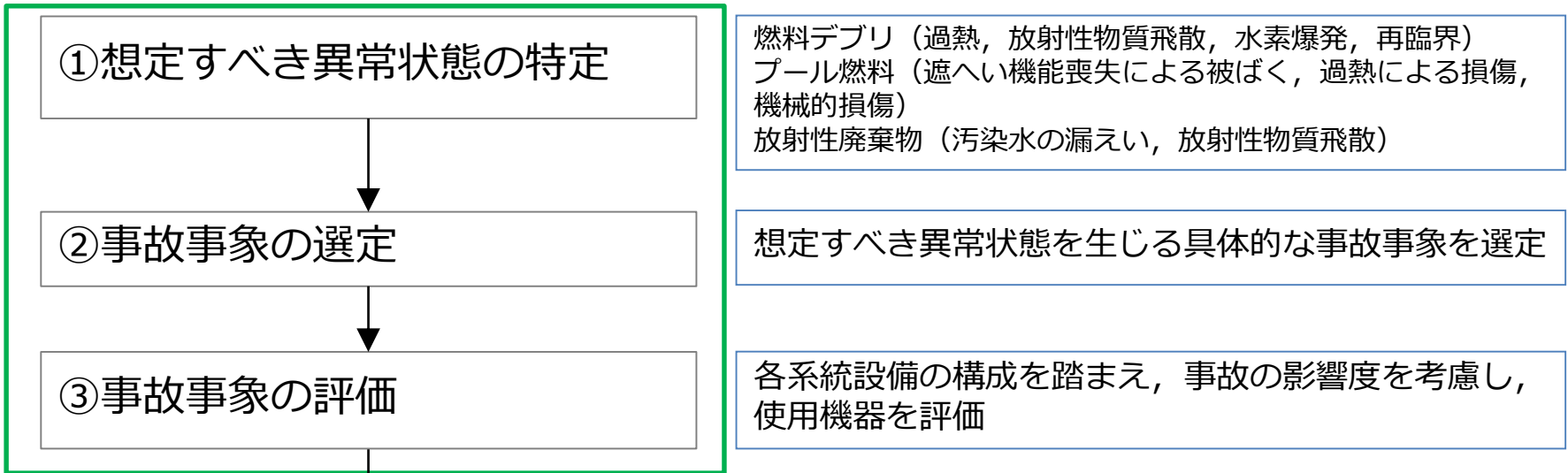
④ リスクを低減するための措置

故障機器の復旧、代替措置の実施、作業停止等の異常時手順に基づく対応等

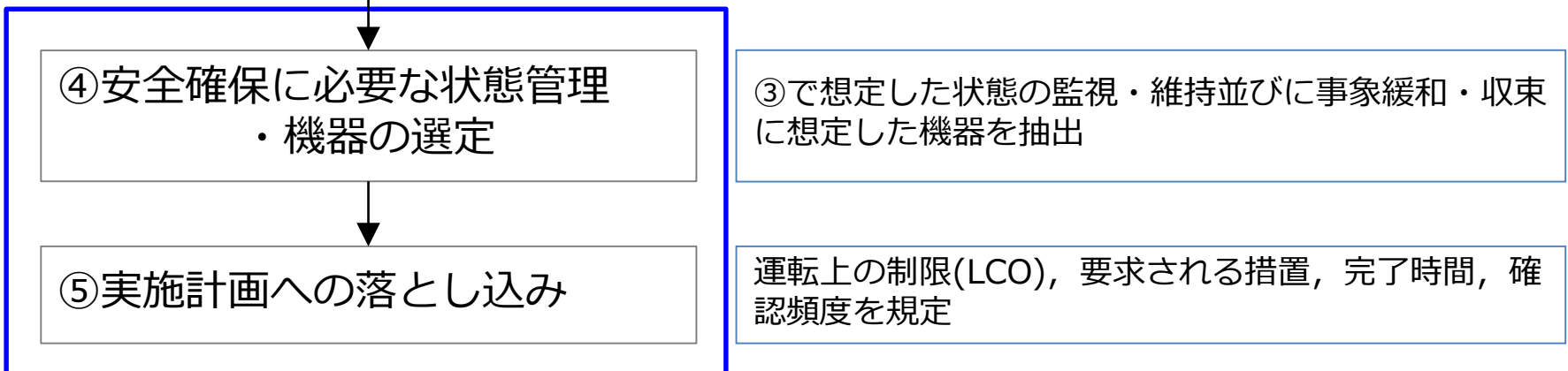
1Fに存在するリスクに対するLCO適正化の検討

- LCO適正化に当たっては、以下の流れで検討を進める。

安全評価のフロー



LCOの制定フロー



事故事象の評価に係る論点

- LCOとは、事故のリスクを許容されるレベル以下に維持するために、安全設備・管理プロセスに期待する状態を設定するもの
- LCOの設定に当たっては、各系統設備の構成、事故の影響度を考慮する必要があるが、下記の論点に対して整理が必要

各種事故 (5mSv/事故※1)

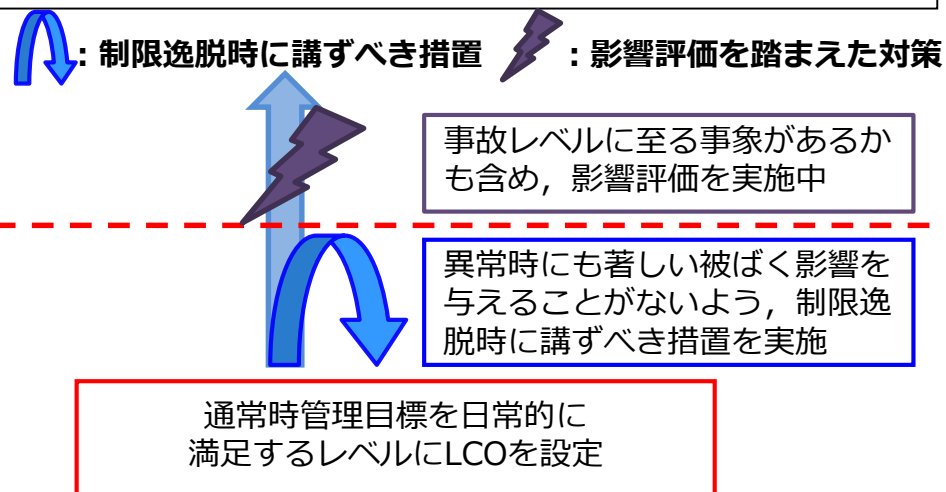
※1 設置許可基準規則の解釈

通常時管理目標 (1mSv/年未満※2)

※2 「措置を講ずべき事項」の要求

個々のオペレーションの管理目標

実際のオペレーション



<論点>

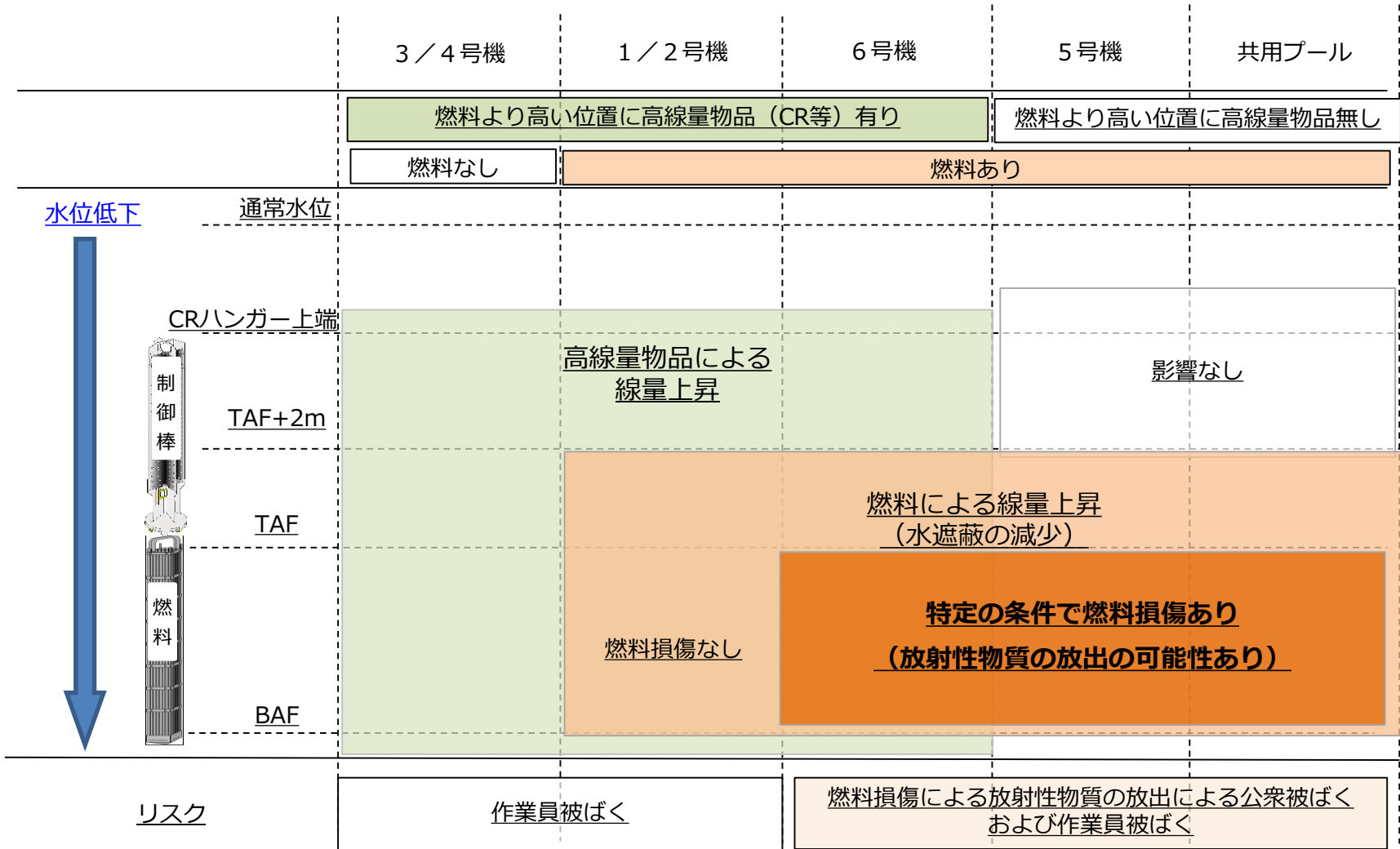
1. LCOに選定する基準をどこに設定すべきか
2. 単一故障を想定し、その故障が安全上支障のない時間内に除去または修復できる場合の扱い
3. 構造健全性を維持するための制限など、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」の各機能に直接関わらないものの扱い
4. 放射性物質の放出や公衆に対する影響はないが、事象が進展すると復旧作業において作業員被ばくが増加するものの扱い

<論点を踏まえたLCO設定の例>

1. LCO逸脱後も講ずべき措置を実施することにより、影響が通常時管理目標を満足するレベルにLCOを設定
2. 事象の進展に十分な時間余裕があるリスクシナリオには、時間余裕を考慮したLCOを設定（時間内に復旧すればLCO逸脱とはしない）
3. SFP水温管理（コンクリートの構造健全性）のような、事象の進展（公衆被ばく等）のリスクに直接的に関連しない制限はLCOとはせず、必要に応じた管理を実施（実施計画の他の章等に記載して管理）
4. 一部のSFPについては、十分冷却された燃料が保管されており、水位が下がっても燃料損傷には至らないことから、LCOとは設定しないが、水位が下がることで周辺線量率が上昇し、復旧作業時の作業員被ばくが増加することから、必要に応じた管理を実施（実施計画の他の章等に記載して管理）

SFP水位低下による影響の整理

- 5 / 6号機, 共用プールは, 特定の条件で燃料が損傷
- 1 ~ 4号機は, 高線量物品や燃料の露出により建屋周辺線量が上昇 (敷地境界への影響は殆ど無し)



使用済燃料の温度及び敷地境界線量率評価結果

使用済燃料プール冷却水喪失時の影響評価結果を以下に示す。

✓ 敷地境界線量率への影響

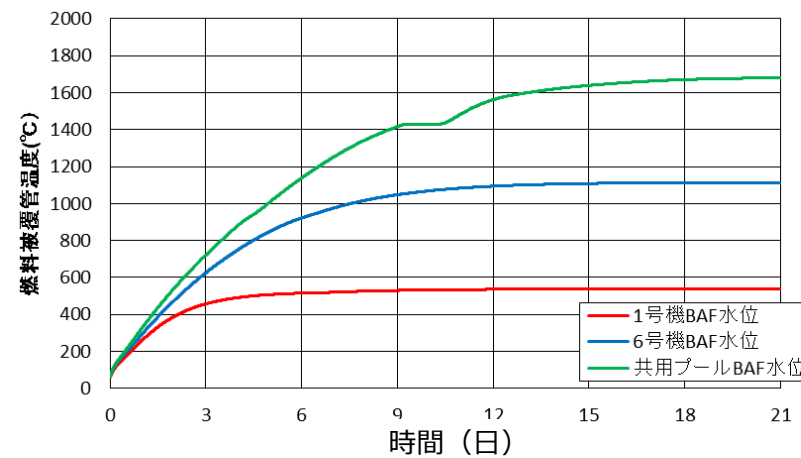
SFP水位が燃料有効底部（BAF）となった場合でも、1/2号機、5/6号機、共用プールの全てにおいて、 $5\mu\text{Sv/h}$ に到達しないと評価している。

✓ 燃料被覆管損傷の影響

プール冷却水が完全に喪失する場合には空冷により損傷しないと見込んでいるが、5/6号機および共用プールについては、冷却水が抜けきらず、燃料下部に滞留した場合は、空冷が十分に行えず、損傷する可能性があるとして評価している。

SFP水位低下時の影響評価結果（BAF到達時）

号機	敷地境界線量率	燃料被覆管損傷	
		完全水抜け	BAF水位 ^{※1,2}
1/2号機 ^{※3}	約 $0.6\mu\text{Sv/h}$	約 200°C	損傷しない
5/6号機 ^{※3}		約 220°C	
共用プール	約 $0.2\mu\text{Sv/h}$	約 310°C	燃料損傷あり



※1 SFP水位がBAF付近において、空冷効果がない条件が継続した場合の評価

※2 最大発熱量の燃料が一律に配置した際の保守的な評価

※3 それぞれ1/2号機の代表として1号機、5/6号機の代表として6号機を評価

BAF水位が継続した場合の評価

SFP水位変化と線量影響（オペフロと建屋周辺：1号機）

- SFP水位が大きく低下した場合には、高線量物品または使用済燃料が露出することにより、オペフロおよび建屋周辺線量が広範囲で上昇
- 一方で、BAF到達時においても、敷地境界への影響は約0.6 μSv/h程度と小さく、また、R/B周辺の地上付近の線量率は、数mSv/h程度であり、注水再開作業は可能

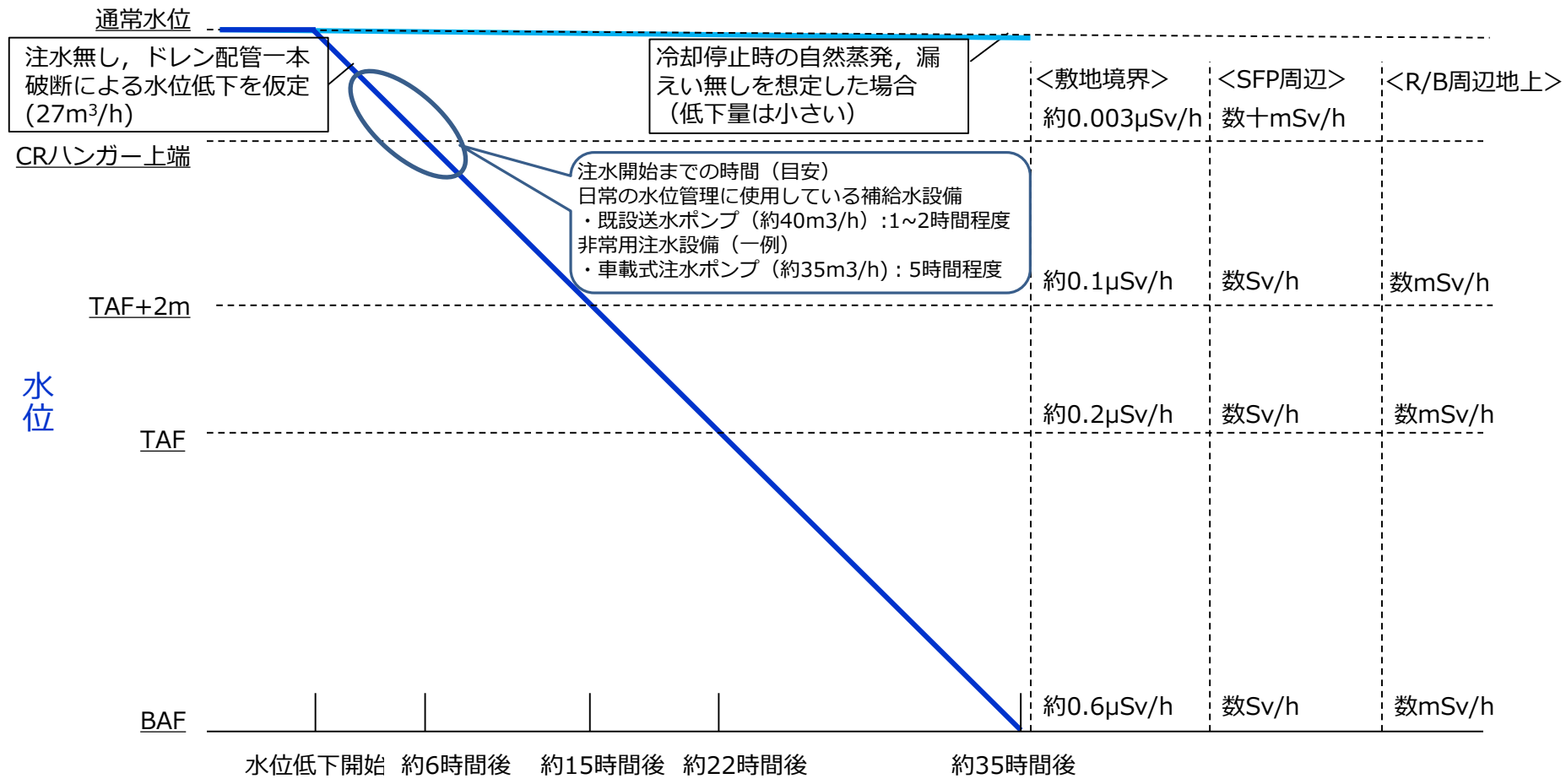
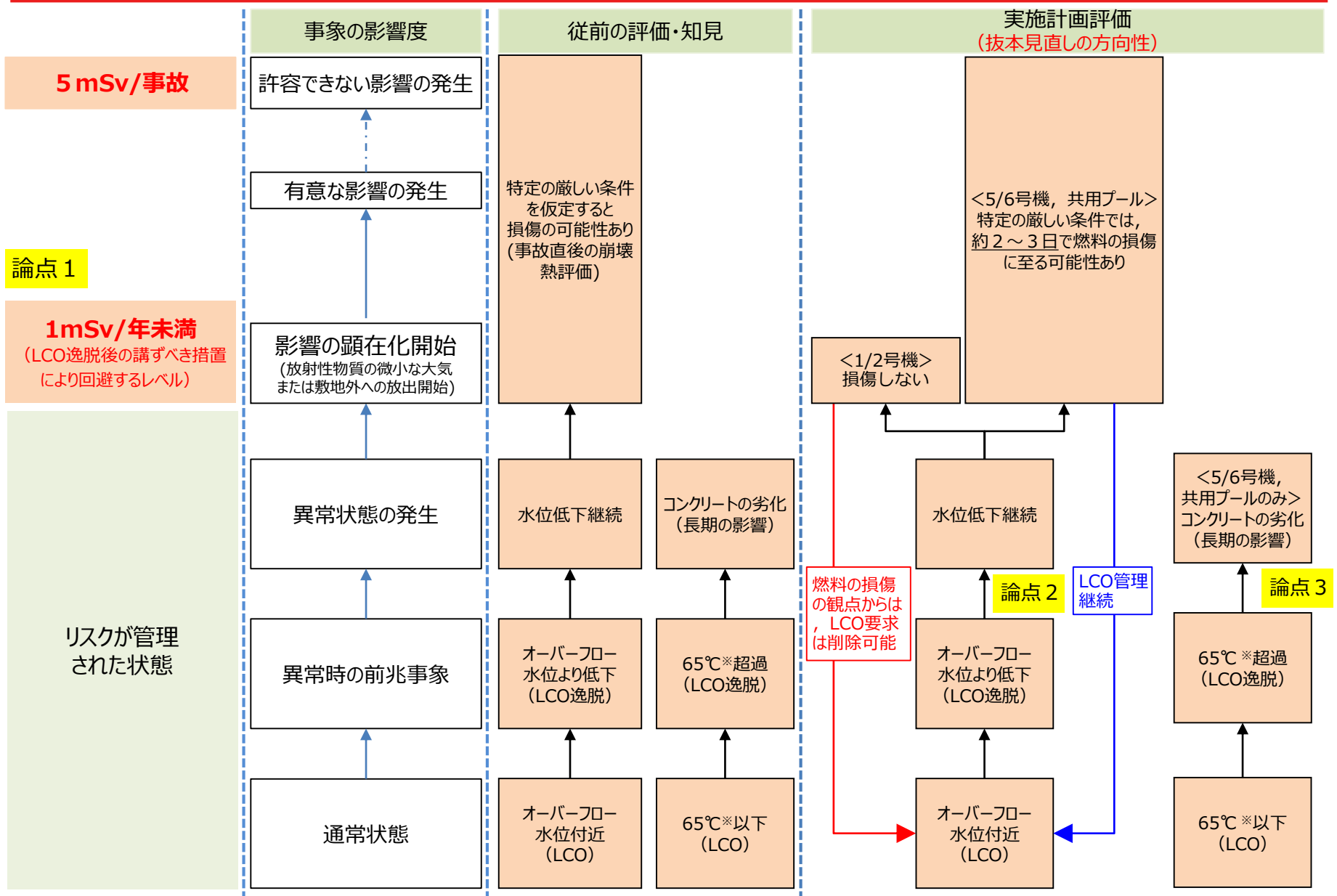


図. SFP水位とオペフロ線量の関係（1号機）

LCO適正化検討（例：第1編第20条・第21条，第2編第55条 使用済燃料プール）



※ 1号機：60℃