

座学 - V(2)

原子炉の事故と安全対策（高速炉）

日本原子力研究開発機構
次世代原子力システム研究開発部門
此村 守

「安全」とは？

- ・ 「安全」と「危険」とは表裏一体の関係にある
 - 「危険」のないところに「安全」の概念はない
- ・ 「危険」とは？
 - 「潜在的な危険」と「顕在化した危険」

原子力施設における「安全」(1/2)

- ・ 対象は？
 - 一般公衆である
 - ・ 「原子力施設における安全」が意味するところは、一般公衆の生命、健康、財産を保護すること
- ・ 一般産業で使われている意味と異なる
 - 通常、一般産業では「従事者の安全」
 - 一般公衆に対する影響は「公害」

原子力施設における「安全」(2/2)

- ・ 一般産業との最大の相違点
 - 放射線被曝が対象
 - 急性の直接的な影響は明確であるが、晩発的な影響における因果関係を明確にすることは容易でない
 - 基本的な対応は、自然界に存在し人類が日常浴びている放射線量を有意に増加させないこと

安全確保のための四つの段階(1/4)

- ・ 立地、設計、建設、運転
- ・ 立地
 - 外部要因ができる限り少ない地点の選択
 - ・ 自然条件（台風・洪水、津波、地震、陥没、地滑り等）と社会条件（火災、爆発、航空機事故）を考慮
 - ・ 設計以降の段階で技術的な対策を取る
 - 離隔
 - ・ 社会からある程度離す

安全確保のための四つの段階(2/4)

- ・ 設計（安全設計）
 - 電力を経済的にかつ高信頼度で供給することが原子炉施設設計の目標
 - 安全設計とは？
 - ・ 設計の中でも特に安全確保の観点から行われる設計
 - 安全を担保するためには、安全設計が基本であるが、これのみで安全が確保できる訳ではない

安全確保のための四つの段階(3/4)

- ・ 建設

- 「設計」の意図を具現化すること
 - ・ 品質管理と品質保証
 - ・ 建設されたものの品質により設計段階で意図されている安全の深さが影響を受ける
 - ・ むやみに一部の品質を高めても全体の品質は向上しない

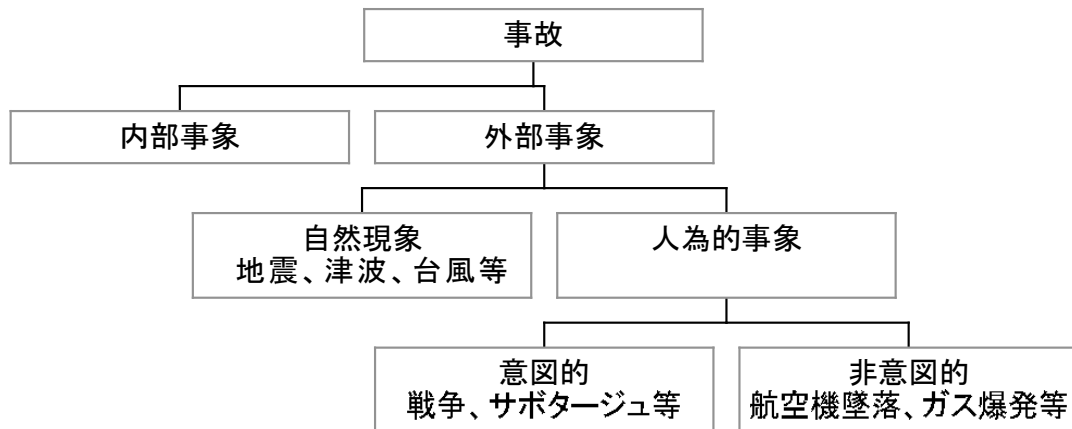
安全確保のための四つの段階(4/4)

- ・ 運転

- 潜在的危険性が生ずる段階
- 原子力施設という「物」とそれを動かす「人」とが恒常的に係る段階
- 設置者の安全運転に対する自覚と自発的努力が最も重要

- ・ 安全確保の第一の責任は設置者にある

事故の要因



安全設計は内部事象を主な対象とする

安全設計の位置づけ

- ・ 安全確保の考え方は、設計の段階で安全設計として具現化される
- ・ 建設も運転も、この安全設計で意図された考え方に基づいて実施される
- ・ 安全審査の主要な対象である

安全設計の基本的な考え方

- ・ 事故原因となる内部事象に対する対策
 - 原子炉施設内部にある異常の原因の同定
 - 拡大の可能性の推定
 - 講ずべき対策の決定
- ・ 設計基準事象の設定と多重防護の思想

設計基準事象(1/2)

- ・ DBE (Design Basis Event)、DBA (Design Basis Accident)とも呼ばれる
- ・ 異常や事故の発端となる事象を「起因事象」という
 - 機器の故障、破損、誤動作、人の誤操作
- ・ どのような事故も、その起因事象から始まり最終状態である事故の結果に至るまで、物理的な因果律に支配される

設計基準事象(2/2)

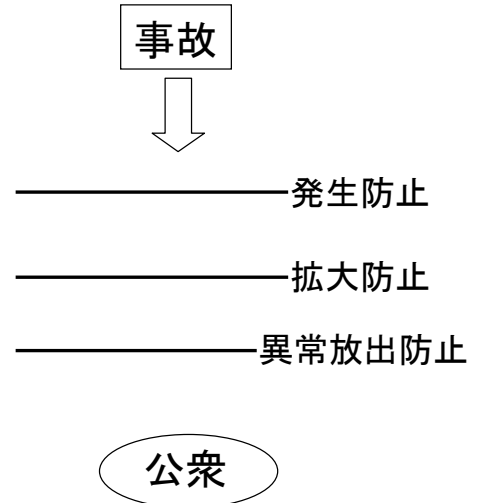
- ・ 複数の事故の事象推移の結果を包絡する事故を人為的に想定することができれば、無数にある事故の事象推移とその結果とを少数の起因事象で代表させることができる
- ・ 設計基準事象とは、その事象で包絡される事故について、設計で安全を担保する範囲を定める事象
- ・ 設計基準事象の事故推移が実際に発生する訳ではない

多重防護(1/2)

- ・ 多重防護（defense in depth）とは、軍事用語で、最前線から後方まで幾重にも防衛体制が確保されていること（深層防護、多層防護とも言う）
- ・ 安全設計では、三つのレベルを設定
 - 異常発生防止
 - 異常拡大防止
 - 放射性物質異常放出防止

多重防護(2/2)

- ・ 三つのレベルのそれぞれに最善を尽くすこと
- ・ その上で、前段否定の論理を持ち込み、後続の防護レベルを規定



異常発生防止

- ・ 原子炉施設の設計の神髄
 - システム設計
 - ・ 全体に対する各系統（機能）の分担のバランス
 - 系統設計
 - ・ 熱輸送等各系統による性能要求の充足
 - 機器設計
 - ・ 要求仕様を満足する機器の設計
 - 安全設計
 - ・ 安全確保の論理の具現化（フェールセーフ、インターロック）

異常拡大の防止

- ・ 異常発生 of 早期発見
 - 運転中のプラント監視系の動作、警報の発報
 - 停止時の定期検査
- ・ 速やかな対策
 - 運転中の安全保護系の動作
 - ・ 安全防護の三大機能のうち「①止める、②冷やす」を担当

放射性物質異常放出の防止

- ・ 原子炉施設に内包されている放射性物質が原子炉施設外へ放散されることを防止
 - 工学的安全系
 - ・ 格納容器及び放射性物質除去設備
 - ・ 安全防護の三大機能のうち「③閉じ込める」を担当

安全防護の三大機能

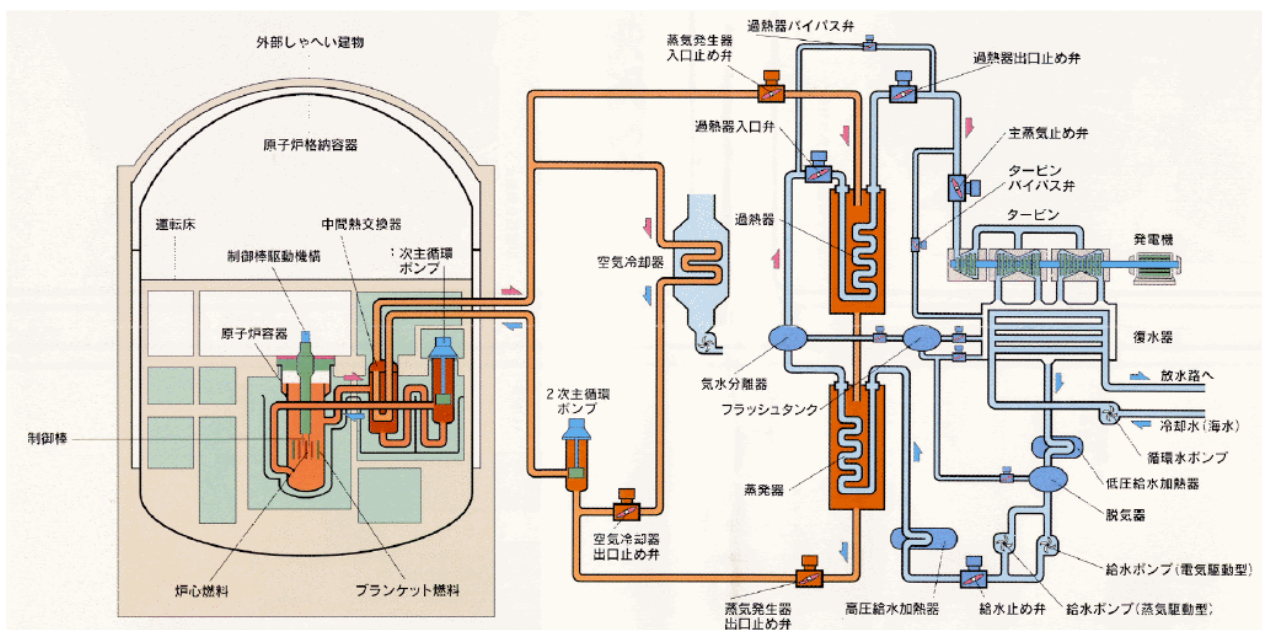
- ・ 目的：公衆を放射線被曝から防護する
- ・ 基本項目
 - ①核反応の停止（止める）
 - ②炉心の冷却（冷やす）
 - ③放射性物質の閉じ込め（閉じ込める）

2007年9月12日

H19年度「敦賀「原子力」夏の大学」

18

高速増殖原型炉もんじゅの主要系統



2007年9月12日

H19年度「敦賀「原子力」夏の大学」

19

高速増殖炉の安全性の特徴(1/2)

- ・ 高速中性子を減速せずに使用するため、親物質であるウラン238を効率よくプルトニウム239に変換し燃料とできる
- ・ 冷却材のナトリウムの沸点は高く（0.1MPaで880℃）、蒸気圧が低いため、高温低圧という条件で運転可能
- ・ バウンダリが破損しても減圧沸騰は起こらず、軽水炉での非常用炉心冷却系に相当する系統は不要
- ・ 運転温度からナトリウムの沸点まで大きな余裕があるため、過渡変化に対する裕度が大きい

高速増殖炉の安全性の特徴(2/2)

- ・ 構造材料は500℃程度の高温で使用するため、クリープ挙動に十分な配慮が必要
- ・ 熱膨張による応力を軽減するため、配管・機器の板厚の薄肉化が必要
 - 地震と熱荷重とのバランスを取った設計が必要
- ・ ナトリウムは化学的に活性であるため、ナトリウム液面を不活性ガスで覆う系統が必要。また、ナトリウムと水との直接接触の影響が炉心に及ばぬよう中間ループ（2次冷却系）が必要
- ・ 炉心中心部で正のボイド反応度特性を持つため、ボイドに対する対策が必要

世界の主な高速増殖炉(1/2)

国名	プラント名	プラント特性			建設・運転実績		現状
		熱/グロス 電気出力 [Mwt/MW]	炉型式	炉心燃料	着工/初臨界 年	累積運 転経年 数	
ロシア	BR-10 (BR-5)	10/- (5/-)	ループ型 実験炉 (ループ 型実験炉)	PuO ₂ /UO ₂ (PuO ₂ /UC)	1971/73 (1957/58)	33 (12)	運転中 (BR-10に 改造)
	BOR-60	60/12	ループ型 実験炉	UO ₂ (一部 PuO ₂ /UO ₂)	1965/69	37	運転中
	BN-600	1470/600	タンク型 実証炉	UO ₂ (将来 PuO ₂ /UO ₂)	1971/80	26	運転中
	BN-800	2100/800	タンク型 実証炉	PuO ₂ /UO ₂ (予定)	1987/(NA)	-	建設中
カザフスタン	BN-350	700/130	ループ型 原型炉	UO ₂ (一部 PuO ₂ /UO ₂)	1965/72	27	廃止決定
アメリカ	EBR-1	1.2/0.2	ループ型 実験炉	Pu合金燃料 (MK-IV炉心)	1949/51	12	廃止
	FERMI	200/61	ループ型 実験炉	U-10Mo合金	1963/66		廃止措置中
	EBR-11	62/20	タンク型 実験炉	金属ウラン燃料	1957/63	29	廃止措置中
	FFTF	400/-	ループ型 実験炉	PuO ₂ /UO ₂	1970/80	13	廃止決定

2007年9月12日

H19年度「敦賀「原子力」夏の大学」

22

世界の主な高速増殖炉(2/2)

国名	プラント名	プラント特性			建設・運転実績		現状
		熱/グロス 電気出力 [Mwt/MW]	炉型式	炉心燃料	着工/初臨界 年	累積運 転経年 数	
フランス	Rapsodie	20(40)/-	ループ型 実験炉	PuO ₂ /UO ₂	1962/1967	16	廃止措置中
	Phenix	563/254	タンク型 原型炉	PuO ₂ /UO ₂	1968/73	32	運転中
	Super Phenix	3000/1242	タンク型 実証炉	PuO ₂ /UO ₂	1977/85	12	廃止措置中
ドイツ	KNK-11	60/21	ループ型 実験炉	PuO ₂ /UO ₂ 、UO ₂	1975/77	12	廃止措置中
	SNR-300	770/327	ループ型 原型炉	PuO ₂ /UO ₂	1973/-	-	計画中止
イギリス	DFR	60/15	ループ型 実験炉	U-7%Mo合金	1954/59	-	廃止措置中
	PFR	600/270	タンク型 原型炉	PuO ₂ /UO ₂	1966/74	18	廃止措置中
インド	FBTR	42/15	ループ型 実験炉	PuO ₂ /UO ₂ カーバイド	1972/86	21	運転中
イタリア	PEC	123/-	ループ型 実験炉	PuO ₂ /UO ₂	1976/-	-	設計段階で中止
中国	CEFR	65/20	ループ型 実験炉	PuO ₂ /UO ₂	-	-	建設中
日本	常陽	100/-	ループ型 実験炉	PuO ₂ /UO ₂	1970/77	29	運転中
	もんじゅ	714/280	ループ型 原型炉	PuO ₂ /UO ₂	1985/94	-	再起動準備中

2007年9月12日

H19年度「敦賀「原子力」夏の大学」

23

高速増殖炉の事故・トラブル

	アメリカ				イギリス		ロシア (旧ソ連)			フランス			日本
	EBR-1	ENRICO FERMI	EBR-2	FFTF	DFR	PFR	BR-5	BN-350	BN-600	Rapsodie	Phenix	Super Phenix	もんじゅ
炉心関係													
炉心溶融	○												
燃料溶融		○											
燃料被覆管の破損					○		○						
反応度低下													
機器からのナトリウム漏洩関係											○		
1次系漏洩										○			
1次系NaK漏洩					○								
1次純化系配管漏洩													
2次系漏洩										○			○
中間熱交換器の漏洩											○		
蒸気発生器の漏洩					○								
ポンプ及び空冷冷却器の漏洩							○						
炉外燃料貯蔵槽の漏洩												○	
蒸気発生器関係													
二重管型伝熱管の破損			○				○						
応力腐食と水漏洩		○											
蒸気発生器水漏洩						○		○	○		○		
伝熱管の大規模破損						○							
ポンプ等の動的機器関係													
ナトリウム循環ポンプの故障			○	○									
冷却系循環ポンプの故障						○							
その他													
性能試験における主容器の内部構造物の振動												○	
カバーガス中への空気の混入によるナトリウム汚染												○	
2次系配管・タンクの欠陥											○		
ナトリウム貯蔵タンク洗浄作業中の爆発										○			
タービン建屋の雪の重みによる部分破損												○	

2007年9月12日

H19年度「敦賀「原子力」夏の大学」

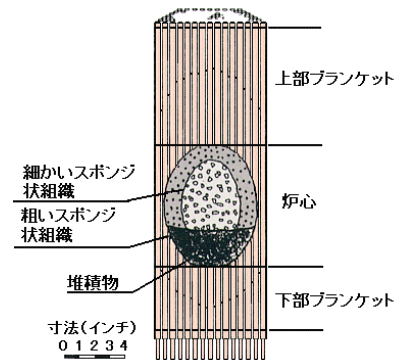
24

EBR-Iの炉心溶融

- ・ 1955年11月29日
- ・ 米国
- ・ ループ型実験炉
- ・ 150 kWe
- ・ U-2%Zr合金燃料
- ・ スクラム失敗



燃料集合体溶融状況
(集合体下部からの写真)



燃料集合体溶融状況説明図

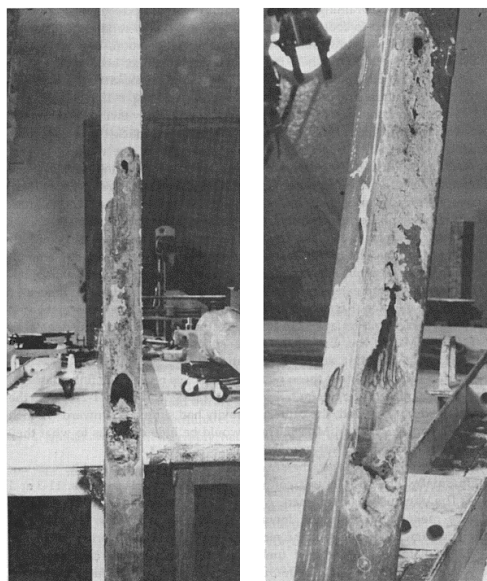
2007年9月12日

H19年度「敦賀「原子力」夏の大学」

25

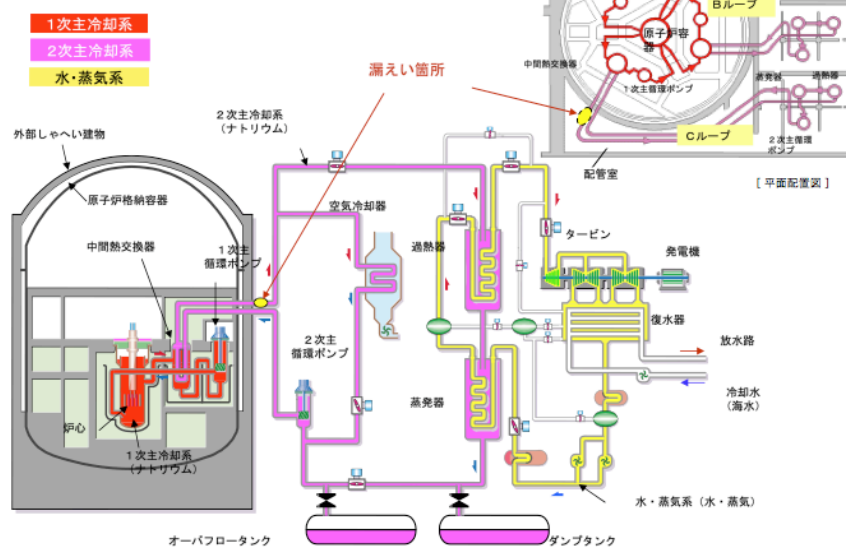
FERMI炉の燃料溶融

- ・ 1966年10月5日
- ・ 米国
- ・ ループ型実験炉
- ・ 60 MWe
- ・ 金属ウラン (U-10%Mo)
- ・ 燃料集合体入口閉塞

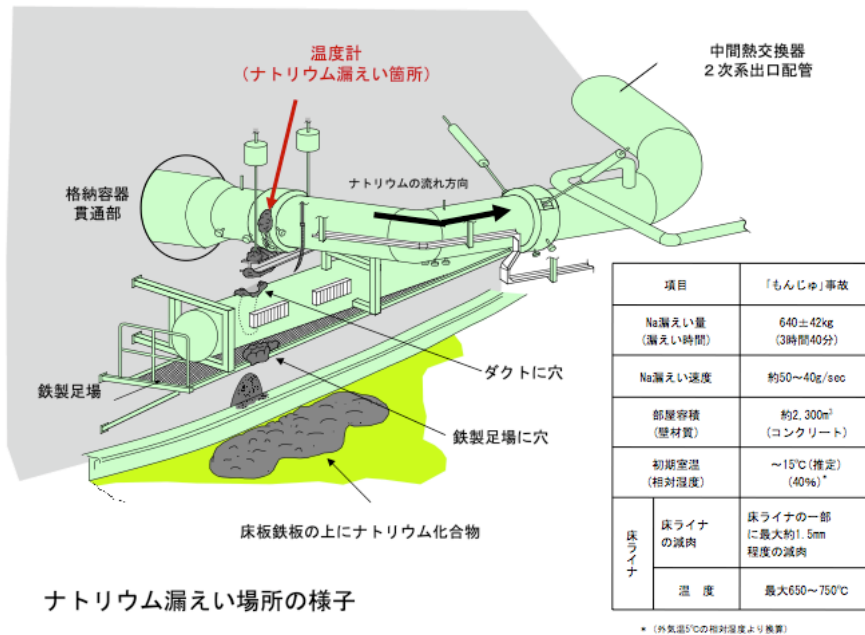


もんじゅ2次系ナトリウム漏洩(1/3)

もんじゅ 2次主冷却系
ナトリウム漏えい事故の概要



もんじゅ2次系ナトリウム漏洩(2/3)



ナトリウム漏えい場所の様子

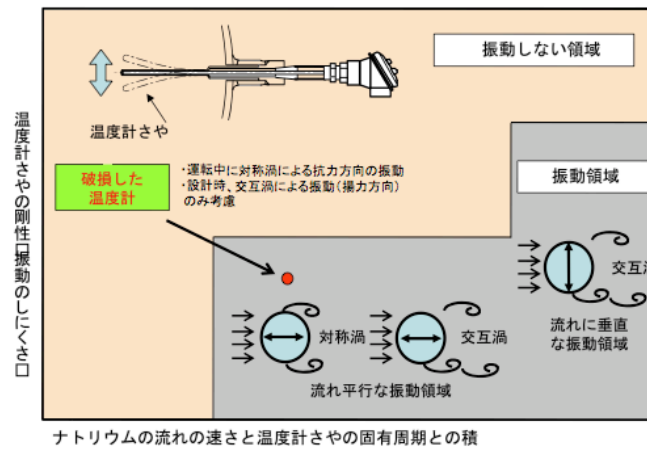
2007年9月12日

H19年度「敦賀「原子力」夏の大学」

28

もんじゅ2次系ナトリウム漏洩(3/3)

温度計破損の原因



技術基準改訂情報の未反映

- ASME N1300 (対称渦も考慮した流体力学振動防止に関する設計指針) に対する対応不足

設計審査の不備

- 従来技術の延長と考えた。
- さや管形状を段付き構造とした。

2007年9月12日

H19年度「敦賀「原子力」夏の大学」

29

まとめ

- ・ 「事故」とは常に不測の事態である
- ・ どのような「事故」も、自然法則に支配された因果律による
- ・ 「包絡性」の概念、すなわち「設計基準事象」の概念が重要であり、これに加えて、「多重防護」の概念が有用である
- ・ 原子炉プラントの最もあり得る挙動を理解した上で、常日頃から技術的な想像力を働かせて、通常状態を逸脱した時のプラントの挙動を洞察する目を養うことが大切