

苛酷原子炉事故における ソーススター評価

福井大学附属国際原子力工学研究所
宮原信哉

原子炉事故と ソーススターク評価の歴史

“Summary Report of Reactor Safeguards Committee” (WASH-3, 1950)

- ▶ 後に「ソースターム」の名で知られるようになったもののを扱った最初の文献
- ▶ 当時の委員会の関心の殆どは、黒鉛減速のプルトニウム生産炉のサイト決定
 - ・黒鉛減速材の火災の可能性
 - ・炉内の全反応生成物が雲になつたら？
 - ・公衆が排除される原子炉周囲のゾーンを規定
(半径 [マイル] : $1/100 \times P [\text{kW}]$)
- ▶ この委員会は、同様の仮定を水減速、水冷却炉にも拡張 (WASH-170, 1956)

英國ウィンズケールの空気冷却黒鉛減速 プルトニウム生産炉で火災発生（1957）

- 火災は一つの燃料チャンネルで発生し、すぐに他の150チャンネルに拡がり4日間燃え続け、最終的には炉を水で満たして鎮火
- 炉は格納容器建屋で覆われておらず、冷却空気は部分的にフィルターを介してスタックから直接大気へ放出
- 大気へ放出された放射性物質は次第に拡散し、イングランド、ウェールズ、北ヨーロッパの一部に沈降
- 地面に沈着した主な放射性核種は、I-131（ヨウ素が評価上重要との認識）
- 小児の甲状腺最大被ばく量は、160 mSv
- 放出された放射性ヨウ素は、約2万Ci（約740 TBq）



【6】出典：Chris Eaton / Storm Clouds over Sellafield / CC BY-SA 2.0

米国原子炉安全防護諮詢委員会 (Advisory Committee on Reactor Safeguards, ACRS) と米国原子力委員会 (Atomic Energy Commission, AEC) (1960)

- ▶ 原子炉のライセンスを与える為に開発された手続きの中で、「ソースターム」という語句を初めて使用
- ▶ その定義によれば、「最外部の建物やコンテインメントシェルに核分裂生成物 (Fission Products: 以下 FP) が放出されるに至る任意の事故が想定される」
- ▶ 全希ガスの100%、ハロゲンの50%、非揮発性物質の1%が放出されると仮定
- ▶ 設計漏えい率で環境中へ漏えいすると仮定

Technical Information Document
14844, "Calculation of Distance Factors for
Power and Test Reactor Sites" (TID-14844*,
1962) (後に10 CFR Part100**, Reactor Site
Criteriaの一部となる)

- ▶ 米国AECが、前記仮定を幾らか修正のうえ、TID-14844を発行
- ▶ サイト周囲の人工分布に対する健康災害の種類と大きさを考
慮したクライテリアの確立を助けるためDBA (Design Basis
Accidents : 設計基準事故) - LOCA (Loss Of Coolant
Accident : 原子炉冷却材喪失事故) (炉心溶融に至らないに
もかかわらず、準炉心溶融状態を定義)に対するソースター
ムを定義

* J. J. DiNunno, et al., "Calculation of Distance Factors for Power and Test Reactor Sites," Technical Information Document (TID) -14844, U. S. Atomic Energy Commission, 1962.

** U. S. Nuclear Regulatory Commission; "Reactor Site Criteria," Title 10, Code of Federal Regulations (CFR), Part 100.

Safety Guide 1.3とSafety Guide 1.4の発行 (1960年代後半)

- ▶ 米国AECが、TID-14844のソーススタークをSafety Guide 1.3 (BWRに対するもの) とSafety Guide 1.4 (PWRに対するもの) にまとめた
- ▶ LOCA時に炉心内蓄積核分裂生成物 (FP) のうち、希ガスは100%、ヨウ素は25%が直ちに格納容器へ放出される
- ▶ Safety Guide 1.3とSafety Guide 1.4は、後に米国原子力規制委員会 (Nuclear Regulatory Commission, NRC) によってその内容が強化され、Regulatory Guide 1.3* (BWRに対するもの) とRegulatory Guide 1.4** (PWRに対するもの) に変更 (1974)
- ▶ TID-14844やRegulatory Guide 1.3とRegulatory Guide 1.4は、その変形が世界中で用いられ、事故時にヨウ素は希ガスと同様に振る舞うとの概念がテクノロジーの世界に深く入り込んでしまった
- ▶ これらの概念は、LOCA時にインベントリの25%のヨウ素が格納容器から漏れると規定したRegulatory Guide 1.3とRegulatory Guide 1.4の交付によってさらに強められた

* U. S. Nuclear Regulatory Commission; "Assumptions Used for Evaluating the Potential Radiological Consequences of a Loss of Coolant Accident for Boiling Water Reactors," Regulatory Guide 1.3, Revision 2, June 1974.

** U. S. Nuclear Regulatory Commission; "Assumptions Used for Evaluating the Potential Radiological Consequences of a Loss of Coolant Accident for Pressurized Water Reactors," Regulatory Guide 1.4, Revision 2, June 1974.

Reactor Safety Study (WASH-1400*, 1975) : ラスムッセン報告

- ▶ 原子炉施設において発生する可能性のあるDBAを含むあらゆる事故を対象に、その発生頻度とその事故がもたらす影響の大きさを数値で推定し、施設の安全性を確率論的に評価
- ▶ ヨウ素と種々の金属（例えばCs）の蒸気は化学的反応性は無く、希ガスと同様の振る舞いを仮定

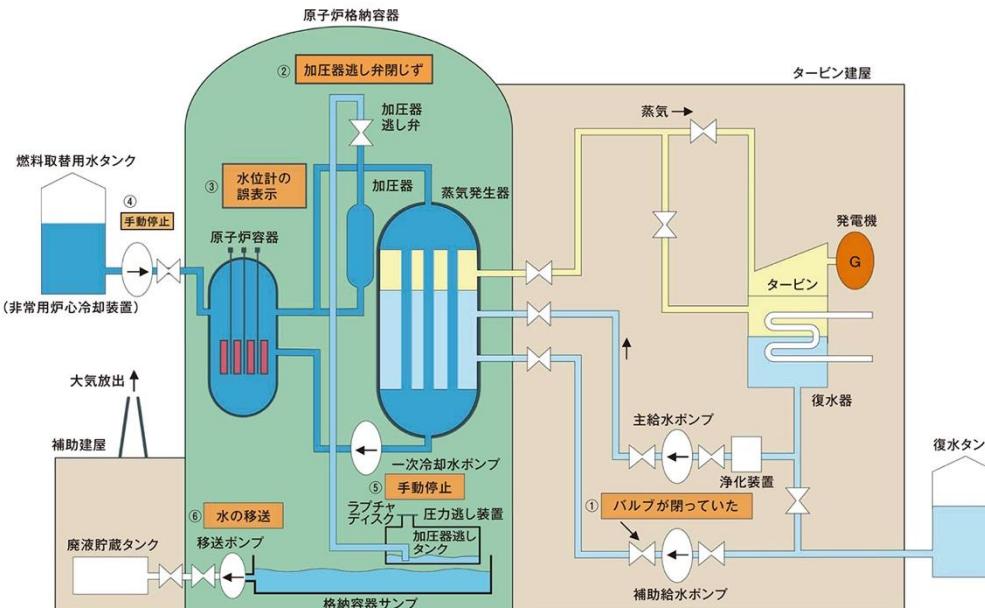
* U. S. Nuclear Regulatory Commission; “Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U. S. Commercial Nuclear Power Plants,” WASH-1400 (NUREG-75/014), December 1975.

米国スリーマイルアイランドの2号炉 (PWR) 事故(TMI-2事故, 1979)

- 装置の誤動作、設計の欠陥、人為エラーが重なり、給水喪失過渡に始まり、部分的に緩和されたLOCAに達する一連のイベントが発生し、炉心が大きく損傷

スリーマイルアイランド原子力発電所事故の概要

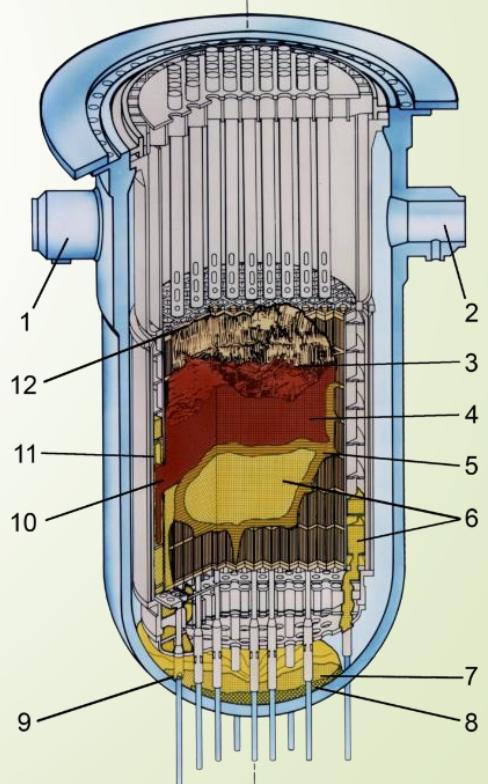
- 事故の主な経緯
1979年3月28日、アメリカのペンシルバニア州スリーマイルアイランド(TMI)原子力発電所2号機で主給水ポンプが停止。補助給水ポンプが自動起動したものの、ポンプ出口弁全閉で二次冷却水循環水が循環せず、また、自動起動した非常用炉心冷却装置(ECCS)を運転員が誤判断し、手動で停止した等、機器の故障や誤操作の結果、炉内構造物が一部溶解した。
- 環境への影響
周辺の公衆が受けた放射線の量は最大で1ミリシーベルト、平均0.01ミリシーベルトと健康上影響のない極めて低いレベルであった。



- ▶ 二次系の放射性物質を含まないところで故障が発生して、主給水ポンプが停止し、結果的に一次冷却系を含む炉心の圧力が上昇し加圧器逃し安全弁が開いた。しかし、圧力が下がると閉じるはずの弁が開いたままで、運転員に弁が閉じられていないことを知らせる警報も正しく動作しなかった。
- ▶ その結果、固着して開いたままの弁から冷却水が失われ、炉心の過熱が起きた。運転員が計器の読みを誤判断したため、その後の操作によって炉心を冷やす冷却材を減らしてしまい、原子炉が深刻な炉心溶融にまで至るという悪い方向へと向かった。
- ▶ 格納容器が破れることはなかったが、発電所補助建屋から放射性物質の環境への放出が起きた。
- ▶ 炉心溶融（メルトダウン）で、燃料の45%、62トンが溶融し、うち20トンが原子炉圧力容器の底に溜まった。
- ▶ 約50%の希ガスとセシウム、30%のヨウ素、ごく少量のその他のFPが炉心から漏えい
- ▶ しかし、環境へ放出されたXe-133、I-131の炉心インベントリに対する割合は、それぞれ $1.6 \sim 8.4\%$ 、 3×10^{-5} であり、セシウムとその他のFPは放出されなかった
- ▶ 原子炉冷却材喪失事故（LOCA）に分類され、想定された事故の規模を上回る苛酷事故（Severe Accident）であったが、前記Regulatory Guide 1.4の希ガスは100%、ヨウ素は25%の想定から大きな相違



【8】 AFP = 時事 / 米工エネルギー省提供



【9】 パブリック・ドメイン

米国原子力学会 (American Nuclear Society, ANS) のソーススタークに関する特別委員会報告書* (1984)

- ▶ TMI-2事故時に、ヨウ素がインベントリの1/25000の約18Ci (約 6.7×10^2 GBq) しか環境に放出されなかつたことから、25%放出を規定している従来の規制指針が余りにも過大評価との指摘
- ▶ 1975年のWASH-1400 “Reactor Safety Study” 以降に公表された知識のレビューを実施
- ▶ 重要なソーススタークは、WASH-1400で想定されたものの $10^{-1} \sim 10^{-6}$ 程度の範囲
- ▶ 主なソーススタークの減衰機構は、過去の評価や研究が貧弱であったFPと冷却材との化学反応およびエアロゾルの減衰
- ▶ 格納容器はこれまでの予想よりも破損し難く、破損までに時間的な余裕があり、この間の化学的、物理的な核種のプロセスがFPを減衰させる主因
- ▶ 苛酷事故の現象には未解明な部分が残されており、将来これらが明らかになればソーススタークは更に減少されよう

* American Nuclear Society: “The Report of the American Nuclear Society’s Special Committee on Source Terms,” September 1984.

米国物理学会 (American Physical Society, APS) の苛酷事故における放射性核種放出に関する研究グループ報告書* (1985)

- ▶ 1984年までに出そろった苛酷原子炉事故の評価に関する研究について、純粹かつ広範な科学的レビューの米国NRCからの委託
- ▶ 目的は、想定された苛酷原子炉事故からの放射性核種放出に対する現象論モデルが依っている技術的な基礎の妥当性、モデル自身の妥当性および事故シーケンスを解析する上でこれらのモデルを取り込んでいる複雑な計算コードが正しく用いられているかをレビュー
- ▶ 大部分のシーケンスと大部分の放射性核種放出についての現象は、WASH-1400で計算されたものよりソースタームを減少させる
- ▶ いくつかのシーケンスに対し、WASH-1400で計算されたものより多くの放射性核種を放出するかもしれない1つのメカニズムは、炉心-コンクリート相互作用における不揮発性放射性核種の放出で、この重要な分野における物理、化学の知識を改善する目的で、現在進行中の実験を完了させることが重要
- ▶ サーベイした最近の研究における解析は、全ての型の原子炉と格納容器について同等の詳細さで扱ったものでは無く、いかなる炉型におけるいかなる事故シーケンスに対しても計算されるソースタームが常に炉停止時のFPインベントリの小さな割合であるという結論を完全に一般化することは不可能

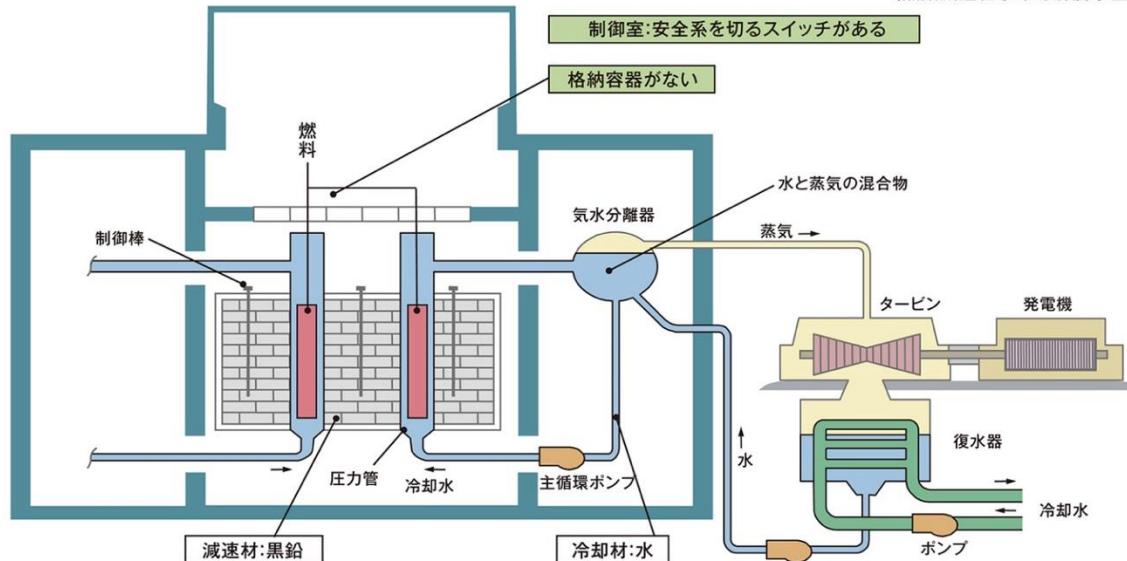
* American Physical Society; “The Report of the American Physical Society of the Study Group on Radionuclide Release from Severe Accidents at Nuclear Power Plants,” February 1985.

チェルノブイリ原子力発電所事故(1986)

- ▶ 1986（昭和61）年4月26日、旧ソ連ウクライナのチェルノブイリ村に立地していた原子力発電所で、近隣の地域はもちろん、東欧や北欧まで放射能が拡散するという、原子力発電所事故としてはこれまで最も重大な事故が発生

チェルノブイリ原子力発電所の構造

（黒鉛減速軽水冷却沸騰水型炉RBMK）



日本の原子炉	チェルノブイリの原子炉	
自己制御性	あり	なくなる場合がある
冷却材	水	水
中性子の減速材	水	黒鉛
安全装置	インターロックにより危険操作の防止	容易に外せる
原子炉をカバーする丈夫な格納容器	あり	なし

- ▶ 原子炉はソ連が独自に開発した黒鉛減速沸騰軽水圧力管型原子炉で、熱出力が320万キロワット、電気出力が100万キロワットのRBMK-1000
- ▶ 外部からの電力供給が止まった場合、タービン発電機の慣性の回転によって、どの程度、発電ができるのかという特殊な実験を行っている最中に発生。原子炉の出力が急上昇し、ウラン燃料の温度も上昇し、蒸気の発生が激しくなり、圧力管の破壊、さらに原子炉と建物の破壊に至り、大量の放射性物質が外部に放出された
- ▶ 爆発とその後の火災により、14 Ebg（エクサベクレル）の放射性物質が大気中に放出された。放射性物質は風に乗って北半球の全域に拡散した。日本では、5月3日に雨水中から放射性物質が確認された
- ▶ 高濃度の放射性物質で汚染されたチェルノブイリ周辺は居住が不可能になり、約16万人が移住を余儀なくされた



【11】パブリック・ドメイン



【12】提供：あはは星人/4742281/PIXTA（ピクスタ）

米国NRCが“NUREG-1465*, ” Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants” を発行 (1995)

- ▶ TMI-2事故後の苛酷事故研究の成果を反映し、事故の進展に応じて格納容器への放出率が変化するようなソーススタークムを考案し、安全評価で適用できるようにした
- ▶ 記載されている内容は、軽水炉の設計に適用可能であり、将来の軽水炉のための規制ガイドンス作成の基礎となることを意図

* U.S. Nuclear Regulatory Commission; “Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants,” NUREG-1465, February 1995.

NUREG-1465で推奨されたFP放出割合

BWRにおける格納容器への放出割合

	Gap Release***	Early In-Vessel	Ex-Vessel	Late In-Vessel
Duration (Hours)	0.5	1.5	3.0	10.0
Noble Gases**	0.05	0.95	0	0
Halogens	0.05	0.25	0.30	0.01
Alkali Metals	0.05	0.20	0.35	0.01
Tellurium group	0	0.05	0.25	0.005
Barium, Strontium	0	0.02	0.1	0
Noble Metals	0	0.0025	0.0025	0
Cerium group	0	0.0005	0.005	0
Lanthanides	0	0.0002	0.005	0

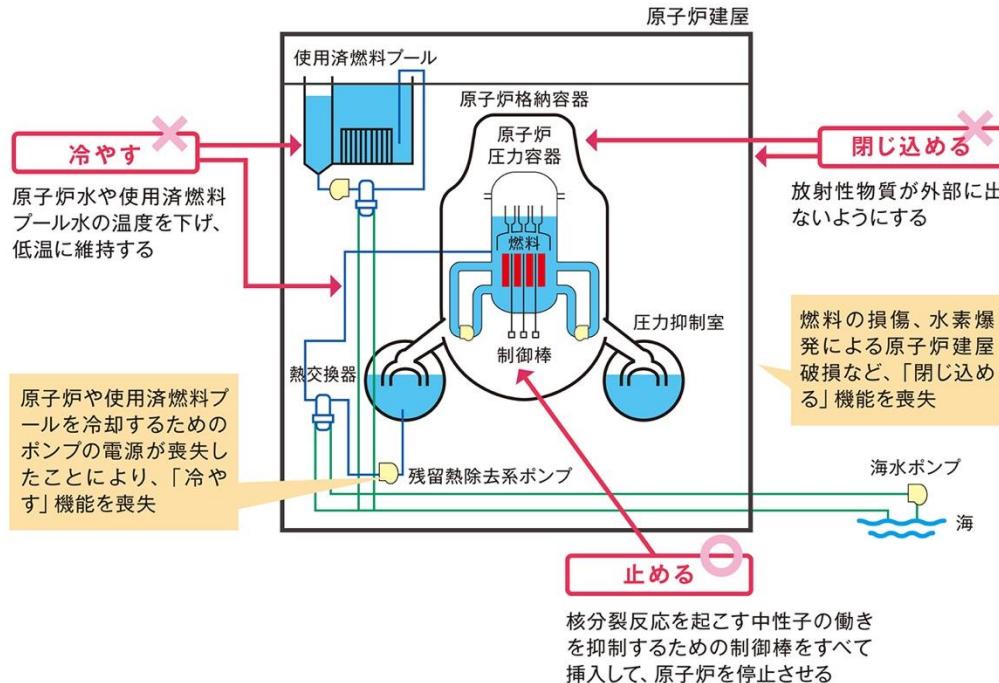
PWRにおける格納容器への放出割合

	Gap Release***	Early In-Vessel	Ex-Vessel	Late In-Vessel
Duration (Hours)	0.5	1.3	2.0	10.0
Noble Gases**	0.05	0.95	0	0
Halogens	0.05	0.35	0.25	0.1
Alkali Metals	0.05	0.25	0.35	0.1
Tellurium group	0	0.05	0.25	0.005
Barium, Strontium	0	0.02	0.1	0
Noble Metals	0	0.0025	0.0025	0
Cerium group	0	0.0005	0.005	0
Lanthanides	0	0.0002	0.005	0

福島第一原子力発電所事故(2011)

- 2011年3月11日午後2時46分三陸沖の海底を震源とするマグニチュード9.0の地震が発生し、運転中であった1~3号機は停止後の炉心の冷却に失敗し、炉心を損傷する事故（苛酷事故）になった

福島第一原子力発電所の事故概要



10-2-2

原子力・エネルギー図面集

- ▶ 地震発生から約50分後に大きな津波の直撃を受け、原子炉の熱を海に逃がすためのポンプなどの屋外設備が破損するとともに、原子炉が設置されている敷地のほぼ全域が津波によって水浸しになった
- ▶ また、タービン建屋などの内部に浸水し、電源設備が使えなくなつたため、原子炉への注水や状態監視などの安全上重要な機能を喪失
- ▶ 各号機とも原子炉停止後に圧力容器への注水ができなくなり、圧力容器内の水が枯渇、燃料の温度が上昇して、水素が大量に発生、燃料の溶融、圧力容器の損傷、格納容器の損傷、原子炉建屋への水素や放射性物質の放出に至るという経過をたどった
- ▶ 福島第一原子力発電所から放出された放射性物質の総放出量（ヨウ素換算値）は、経済産業省原子力安全・保安院が約77万テラ（テラは1兆）ベクレル、内閣府原子力安全委員会が約57万テラベクレルと推計。なお、チェルノブイリ事故での総放出量は約520万テラベクレル



上【16】出典：東京電力ホールディングス



下【17】出典：東京電力ホールディングス

放出された放射性核種の種類と量 (ソーススターク) の比較(TBq)

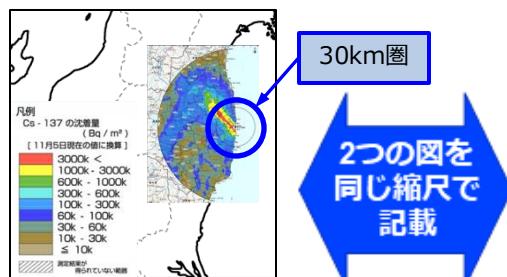
放射性核種	ウインズケール	TMI-2	チェルノブイリ	福島第一
I-131	740	はるかに少ない	1,760,000	130,000
Cs-137	22	はるかに少ない	79,500	35,000
Xe-133	12,000		6,500,000	17,000,000
Xe-135		ウインズケール の25倍		
Sr-90		はるかに少ない	80,000	
Pu			6,100	

出典 : Wikipedia

Chernobyl Nuclear Power Plant Accident and Tepco Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident Comparison of Scale

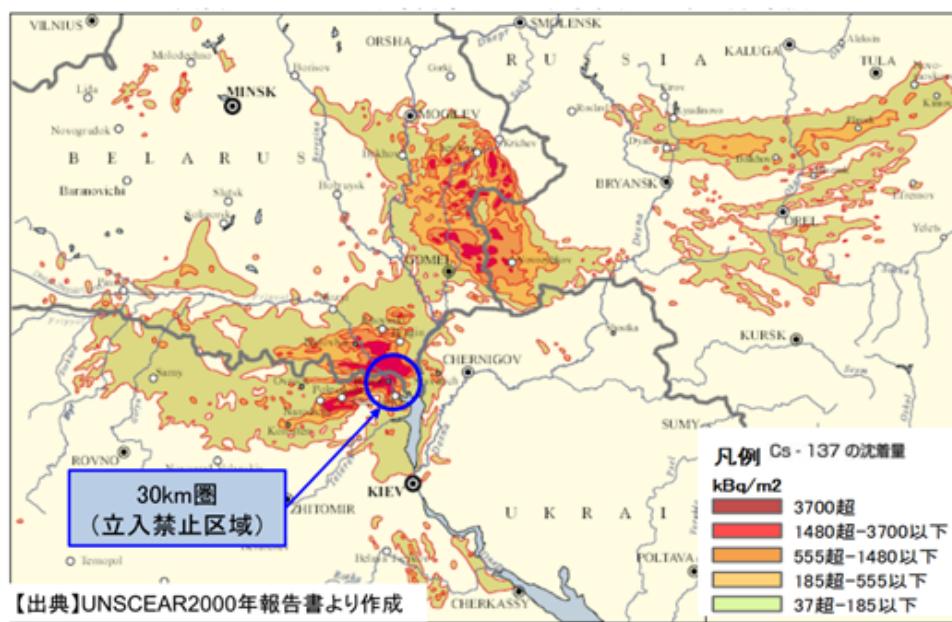


東京電力福島第一原子力発電所事故による汚染（2011年11月時点）



30km圏
2つの図を
同じ縮尺で
記載

Chernobyl Nuclear Power Plant Accidentによる汚染（1989年12月時点）



【出典】UNSCEAR2000年報告書より作成

【19】文部科学省報道資料（平成23年12月16日）「文部科学省による第4次航空機モニタリングの測定結果について」を元に作成

汚染濃度 (kBq/m ²)	汚染地域の面積 (km ²)		Chernobyl Nuclear Power Plant Accident と比較した東京電力福島第一 原子力発電所事故の規模
	Chernobyl Nuclear Power Plant Accident	東京電力福島第一 原子力発電所事故	
> 1,480	3,100	200	6 %
555 – 1,480	7,200	400	6 %
185 – 555	18,900	1,400	7 %
37 – 185	116,900	6,900	6 %
合計面積	146,100	8,900	6 %

出典：原子力被災者生活支援チーム「年間20ミリシーベルトの基準について」（平成25年3月）より作成
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130314_01a.pdf

【18】出典：環境省ホームページ（<https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h30kisoshiryo/h30kiso-02-02-06.html>）
各原図の著作者に許可を得て使用

我が国の規制体系における ソースターム評価の変遷

福島第一原子力発電所事故以前 (原子力委員会)

- ▶ 「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」（昭和53年9月29日）は、米国NRCが定めたRegulatory Guide 1.3 (BWRに対するもの) とRegulatory Guide 1.4 (PWRに対するもの) の強い影響を受けたもの
- ▶ 「仮想事故後、原子炉格納容器内に放出される核分裂生成物の量の炉心内蓄積量に対する割合は、希ガス100%、ヨウ素50%と仮定する」と定められていた
- ▶ その判断基準は「原子炉立地審査指針」（昭和39年5月27日）による
 - ・原子炉の周囲は、原子炉からある距離の範囲内は非居住区域であること
 - ・原子炉からある距離の範囲内であって、非居住区域の外側の地帯は、低人口地帯であること
 - ・原子炉敷地は、人口密集地帯からある距離だけ離れていること

設置許可における安全評価で用いられた条件 (PWRのLOCA)

条件	重大事故	仮想事故
格納容器への放出量	<ul style="list-style-type: none">・希ガス : 2%・ヨウ素 : 1% <p>(有機ヨウ素 : 0.1%、無機ヨウ素 : 0.9%)</p>	<ul style="list-style-type: none">・希ガス : 100%・ヨウ素 : 50%
沈着率等	<ul style="list-style-type: none">・無機ヨウ素 : 50%・スプレイ水による除去効率は実験評価値に余裕を見込んだ値	<ul style="list-style-type: none">・ECCS再循環水中にヨウ素50%が溶解
直接線量及びスカイシャイン線量評価における放出量	<ul style="list-style-type: none">・希ガス : 2%・ハロゲン : 1%・その他 : 0.02%	<ul style="list-style-type: none">・希ガス : 100%・ハロゲン : 50%・その他 : 1%

福島第一原子力発電所事故以降 (原子力規制委員会)

- ▶ 「実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」（平成25年6月19日）および「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」（平成25年11月27日）を定めた
- ▶ 新規制基準の適合性審査において、重大事故対策の有効性評価の中で「Cs-137の放出量が100 TBqを下回る」というソーススターク指標を導入
- ▶ 発電用原子炉設置者が実施する安全性向上評価において、確率論的リスク評価（PRA）によりソーススタークの発生頻度、Cs-137の放出量が100 TBqを超える事故シーケンスの合計発生頻度を示す

苛酷原子炉事故 (Severe Reactor Accident) 時のソースターム関連事象の進展

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【6】	‡	Chris Eaton / Storm Clouds over Sellafield / CC BY-SA 2.0
【7】	‡	日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」
【8】	‡	AFP=時事 / 米エネルギー省提供
【9】	PD	NRC Image of TMI-2 Core End Stable State
【10】	‡	日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」
【11】	PD	Redrat72/The Chernobyl reactor #4 with enclosing sarcophagus.
【12】	‡	提供：あはは星人/4742281/PIXTA（ピクスタ）
【13】	‡	L. Soffer, S.B. Burson, C.M. Ferrell, R.Y. Lee, J.N. Ridgely. (1995). Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants (NUREG-1465). U.S. Nuclear Regulatory Commission.
【14】	‡	L. Soffer, S.B. Burson, C.M. Ferrell, R.Y. Lee, J.N. Ridgely. (1995). Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants (NUREG-1465). U.S. Nuclear Regulatory Commission.
【15】	‡	日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【16】	‡	東京電力ホールディングス
【17】	‡	東京電力ホールディングス
【18】	‡	環境省ホームページ (https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h30kisoshiryo/h30kiso-02-02-06.html) 各原図の著作者に許可を得て使用
【19】	‡	文部科学省報道資料（平成23年12月16日）「文部科学省による第4次航空機モニタリングの測定結果について」を元に作成