
ソースターム評価に関わる諸課題と 今後の取り組み

過酷事故解析とソースターム

令和2年1月14日

○梶本 光廣、星 陽崇、鈴木ちひろ

原子力規制庁長官官房
技術基盤グループ
シビアアクシデント研究部門

報告内容

■ はじめに

■ ソースターム評価に関する研究

- シビアアクシデント時の放射性物質挙動
- 確率論的リスク評価

■ 安全評価等へのソースターム指標
の適用

■ おわりに

はじめに

- 2011年3月11日の東日本大震災の際、東京電力福島第一原子力発電所の1号から3号までが炉心損傷に至り、多量の放射性物質が原子炉施設から放出¹⁾されるという、重大な事故が発生した（以後、「福島原子力発電所事故」）。
- このようなシビアアクシデント時の放射性物質挙動については、1979年に発生したTMI-2事故以後、シビアアクシデント（SA）研究及び確率論的リスク評価（PRA）の研究の相互補完によって、多くの知見が蓄積されてきた。

はじめに(続き)

- 「ソースターム」とは、
 - 放出される放射性物質の種類、性状、放出量、放出開始時期、放出継続時間等の総称のこと。
 - 放出先が「大気中」の場合が一般的であるが、「格納容器」等の場合もある。
- シビアアクシデント時のよう素類の大気中への放出割合（対炉心内蔵量）は、TMI-2事故で 10^{-4} % 程度、チェルノブイリ事故で20 %程度～半分程度、福島原子力発電所事故で数%（号機で異なる）であり、事故によって様々である。
- 本報告では、事故時のソースターム評価及び安全評価等への適用の現状並びに今後の課題についてふれる。

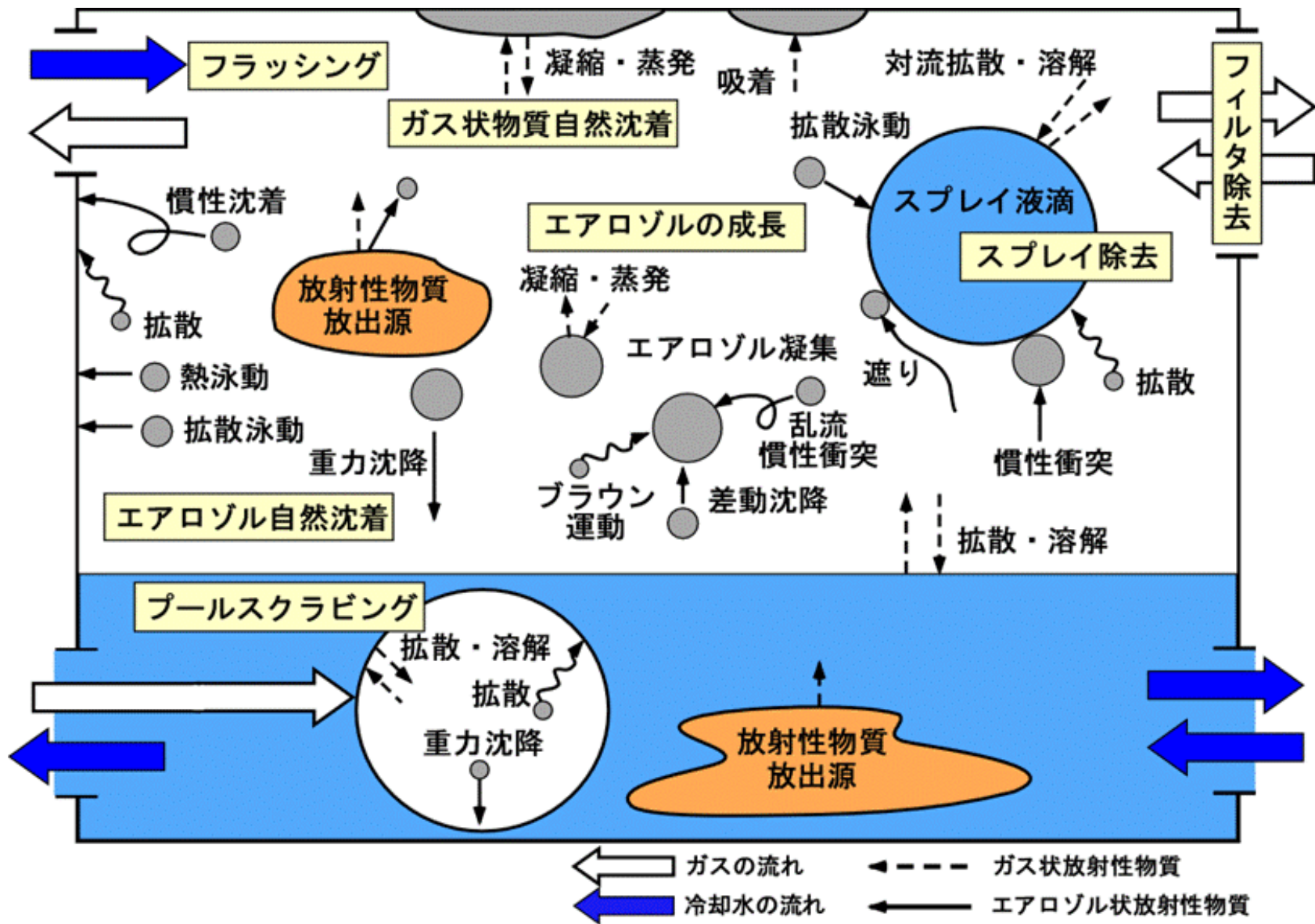
ソースターム評価に関する研究

SA時の放射性物質挙動

事故時に燃料から放出された放射性物質は、原子炉冷却系内で沈着すると共に、一部は配管破断口や逃し安全弁を經由して、格納容器系へ移行する。

格納容器内では、沈降及び凝縮等の自然沈着、格納容器スプレイ及び圧力抑制プールなどの工学的安全設備によって雰囲気中から除去される。

■ これらの解析モデルの多くは1970年代から1990年代半ばまでに日本を含む欧米各国やOECD/NEA等の国際協力試験計画などの試験の結果を利用して検証された。



梶本光廣，「連載講座軽水炉の確率論的安全評価（PSA）入門 第5回内の事象レベル2 PSA」，日本原子力学会誌, Vol. 48, No. 8, 571 (2006).

放射性物質の沈着・除去

性状	沈着機構	機構を支配する物理量
エアロゾル	拡散	濃度差(濃度勾配)
	重力沈降	重力
	熱泳動	温度差(温度勾配)
	拡散泳動	水蒸気凝縮流
	慣性衝突	慣性力
気体	拡散	濃度差(濃度勾配)
	吸着	化学反応
	凝縮・蒸発	蒸気圧と分圧の差
	溶解	溶解度、加水分解等(気液平衡)

- 格納容器スプレイや圧力抑制プールでのプールスクラビングによる放射性物質除去も、上記と同様の機構が作用する。
- エアロゾルは、衝突・合体、凝縮・蒸発によって、大きさが急速に変化する。

SA時のソースターム研究の現状と課題

■ エアロゾルや気体状物質の自然沈着については、エアロゾル工学、大気力学、工業化学等の分野で、古くから研究されており、試験結果をよく再現する解析モデルも提案されている。

■ しかしながら、高温・高圧の多成分混合気体中での放射性物質の自然沈着や工学的安全設備による除去について

- 化学反応による事故晩期の揮発性放射性物質の生成及び沈着物質の再蒸発、
- 粒子径がサブミクロンから数 μm の領域におけるスプレー液滴や気泡との相互作用、

等のような、解析上で不確かさが大きな現象の解析モデル開発・改良及び検証のための最新測定技術を適用したデータの蓄積が重要である。

確率論的リスク評価 (PRA)

■ SA研究の進展に伴って、事故進展及び放射性物質挙動の**特徴が類似した少数の事故シーケンスグループ**に分類できることが分ってきた。

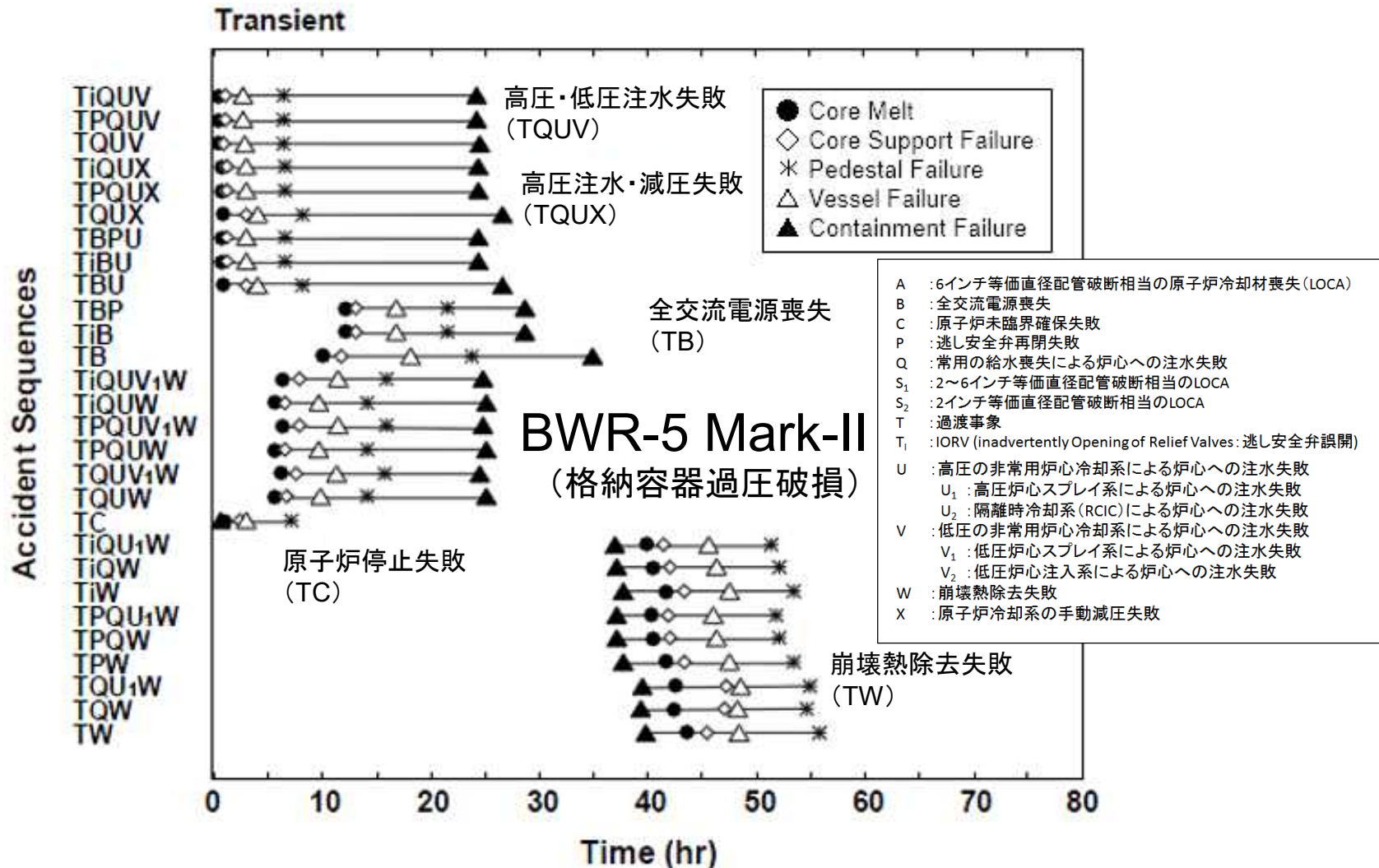
これらの知見は、原子力規制委員会が策定した**新規制基準の技術的背景**になっている。

事故シーケンス：

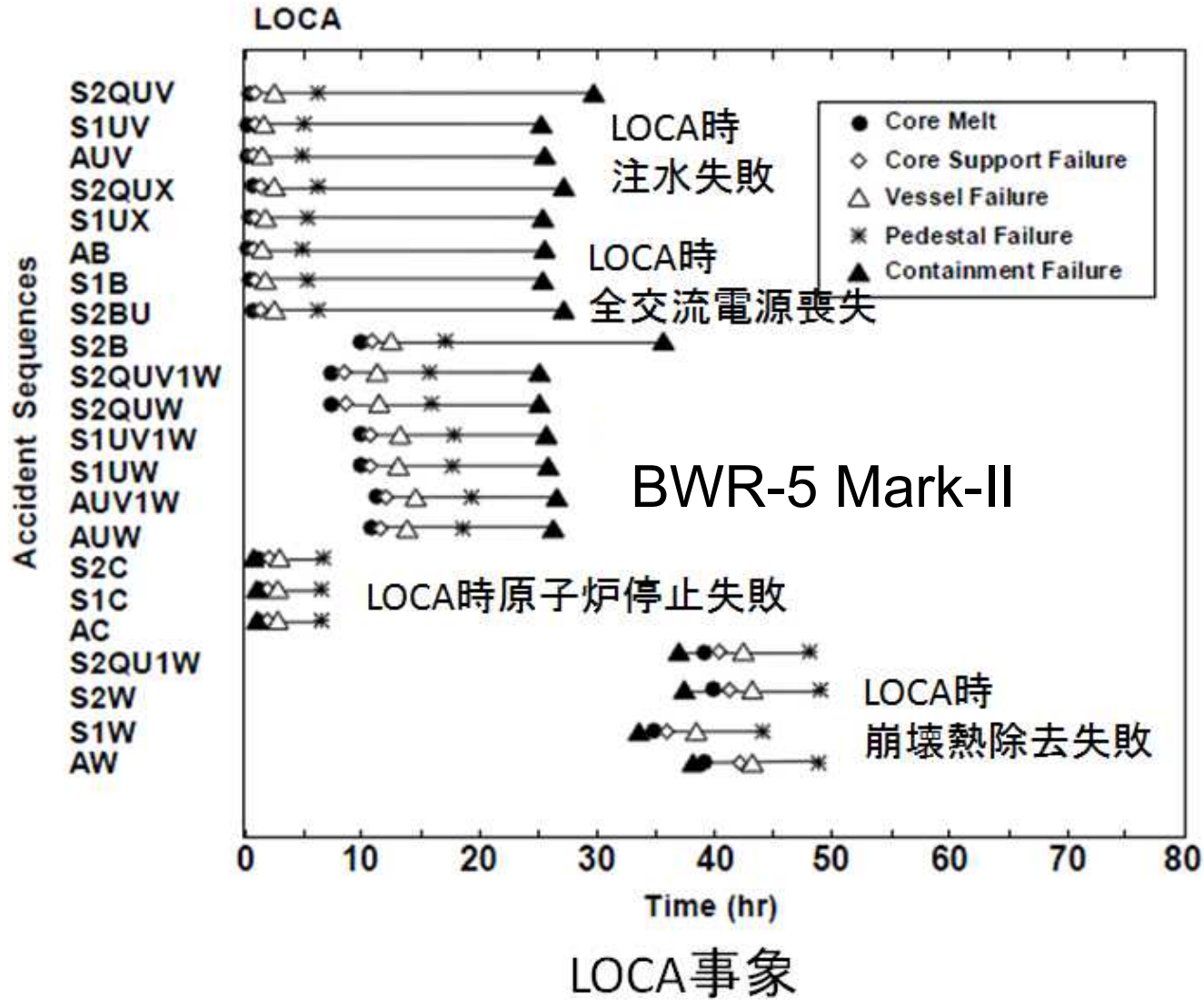
事故の発端の事象、事故緩和系の機器・系統の成功・失敗の組合せのこと

■ 1990年代の初めには、SA研究とPRAの研究の成果とが相互補完できるようになり、事故シーケンスグループの検討が飛躍的に進んだ。これらの成果は、日本原子力学会の**PRA実施基準 (レベル2 PRA)**にも反映されている。

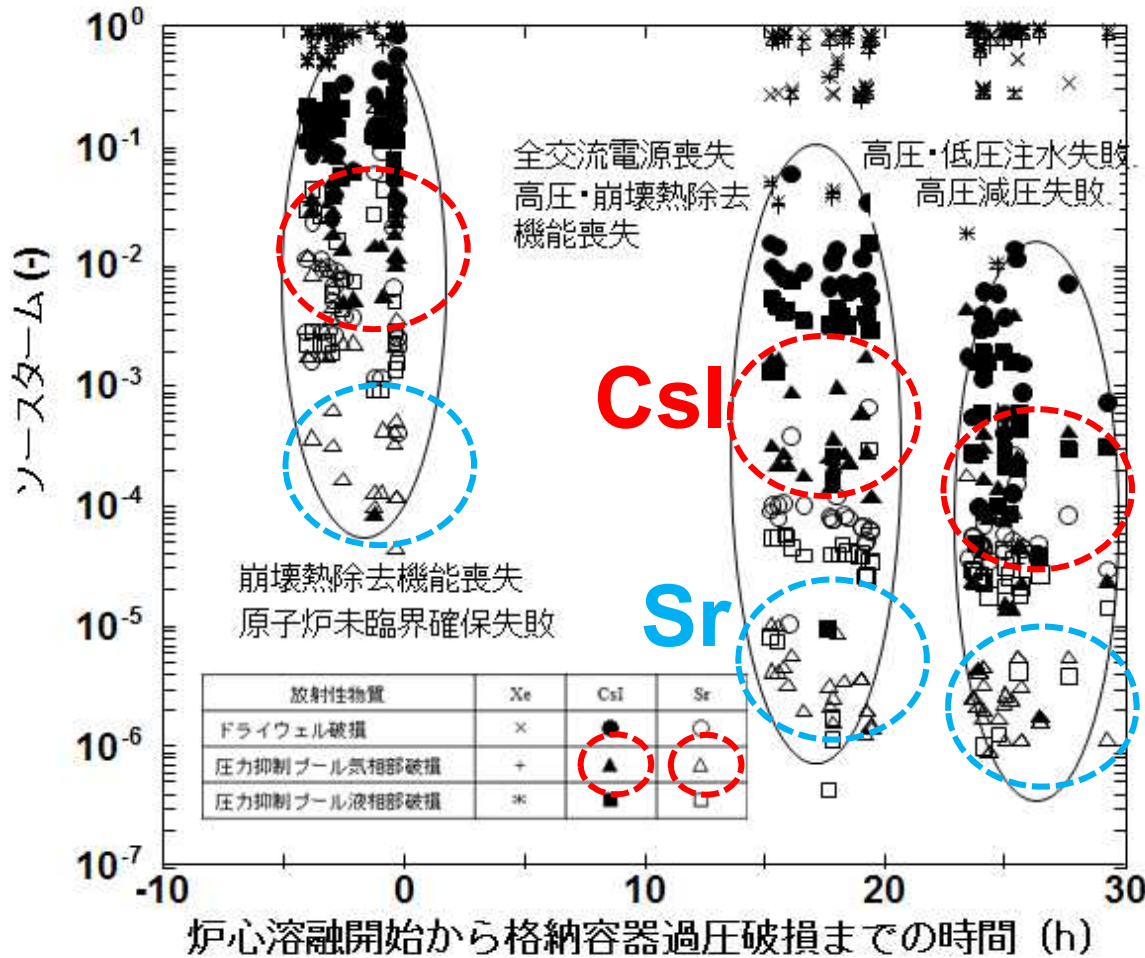
SAの事故進展の特徴



事故シーケンスグループ：LOCA (BWR-5 Mark-IIの例)



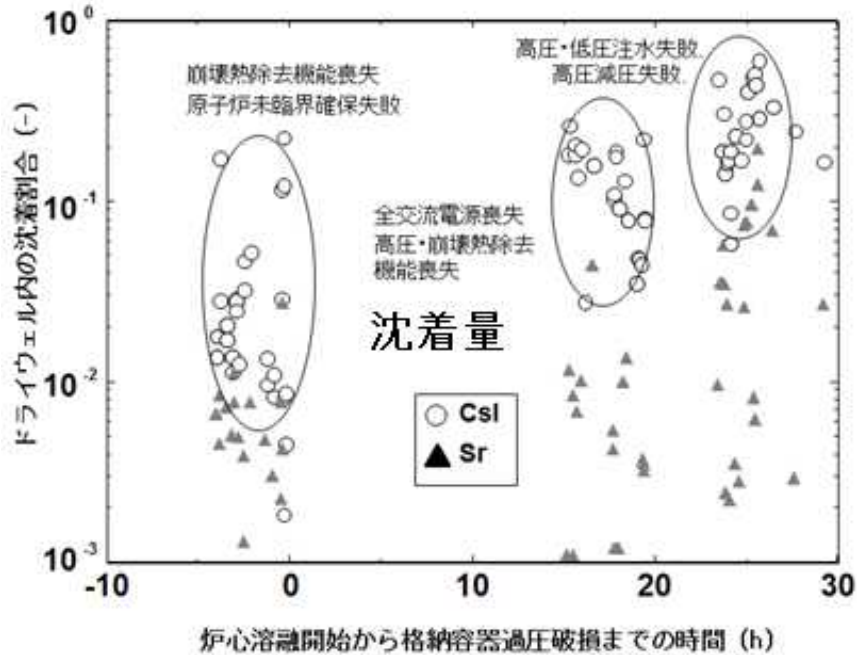
SA時のソースターム



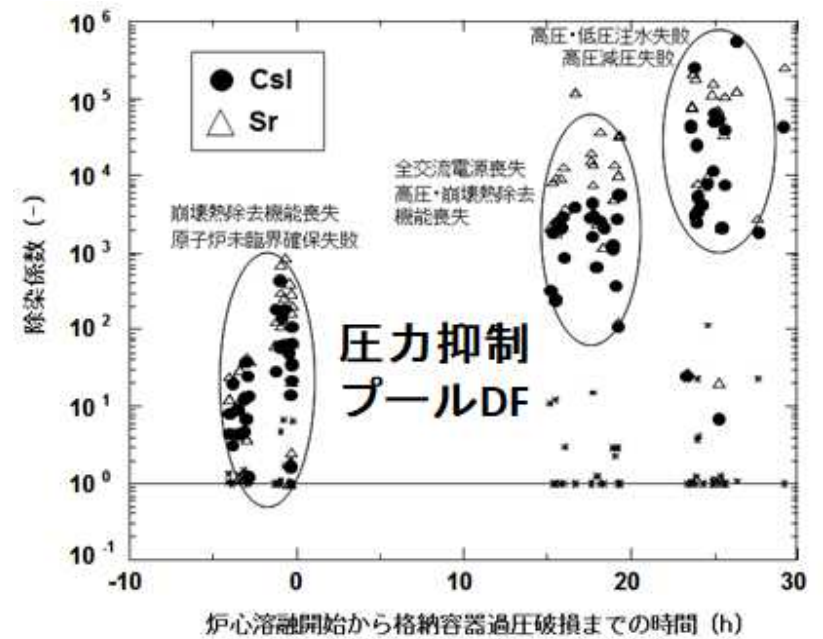
破線丸印を付しているのは、圧力抑制プール気相部が破損した場合のソースターム。

CsIに着目すると、同じ事故シーケンスグループのソースタームは**1桁程度の幅**に収まる。ただし、同じ事故シーケンスグループであっても、**破損箇所が異なるとソースタームは桁で相違する。**

格納容器内での沈着量



圧力抑制プールの除染係数



炉心損傷から格納容器破損に至るまでの時間が長い事故シナリオでは、燃料から放出されたよう素やセシウム、ストロンチウム等は、格納容器内での自然沈着で多くが除去される。

圧力抑制プールでのプールスクラビングによる放射性物質の除染効果は大きく、全交流電源喪失の事故シナリオで概ねDF=1000、高圧・低圧注水失敗のケースではDFが1000を超える。

PRA（レベル2 PRA）の現状と課題

ソースタームの不確実さ幅

放射性物質の自然沈着や工学的安全設備による除去などの解析モデルの近似による不確実さ、事故シーケンスによる事象発生タイミングの不確実さ等、ソースタームの不確実さ幅の支配的要因を系統的に分析することが重要である。

ソースターム総合解析コード

実炉規模相当のスケールでソースタームを評価するためには、事故シーケンス条件に沿って相当数の放射性物質挙動の計算が必要である。

このようなソースターム総合解析コードの開発・改良を継続し、SAの知見を集約して蓄積することが重要である。

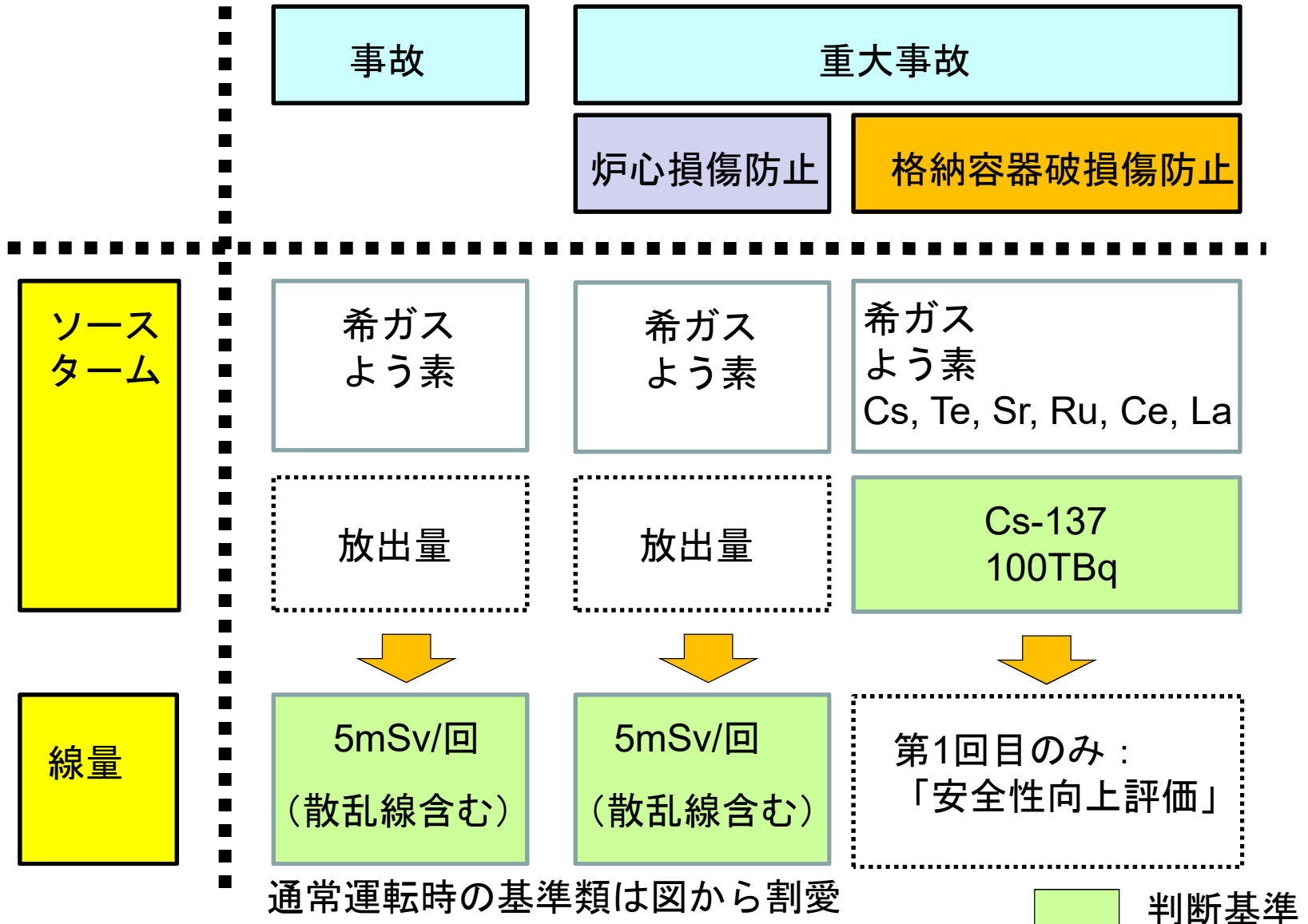
ソースターム指標の適用

- 原子炉施設の安全評価では、周辺監視区域や敷地境界近傍の線量が一つの指標になっている。例えば、日本の安全評価の「事故」の判断基準の一つは線量である。

この線量を計算するためには、原子炉施設から大気中へ放出される放射性物質の種類、性状、放出開始時期、放出継続時間といった、いわゆるソースタームの評価が必要である。

- ソースタームは、**事故時の緩和設備の種類・性能及び操作等の原子炉施設の固有の性能**を表しており、気象条件などの影響が少ないことから、原子炉施設の安全性の指標として利点がある。

ソースターム指標の利用



安全評価等とソースターム

- 米国及び日本において、安全評価で利用されるソースターム（格納容器）は、**瞬時放出を仮定する等の相当な保守性**があった。
- 米国NRCは、TMI-2事故後のSA研究の成果を反映して、**事故の進展に応じて格納容器への放出率が変化**するような格納容器へのソースターム（NUREG-1465）を考案し、安全評価で適用できるようにした。
- また、日本は福島原子力発電所事故後の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100TBqを下回る」というソースターム指標を利用した。

新規制基準に適合したPWR型原子炉施設のCs-137の放出量の評価はいずれも数TBqである。

ソースターム指標の主な適用

分野	内容	備考
新規制基準 適合性評価 (有効性評価)	Cs-137の放出量が100TBq を下回っていること、	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 策止及び格納容器破 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)。
安全性向上 評価	ソースタームの発生頻度(希 ガス類、よう素類、セシウム 類、.....)、 Cs-137の放出量が100TBq を超える事故シーケンスの 合計発生頻度、	原子力規制委員会、 「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)

ソースターム指標の主な適用（続き）

分野	内容	備考
原子力災害 事前対策	事前対策において備えておくことが合理的であると考えられる事故は、「Cs-137の放出が100TBqに相当するもの」、	平成30年度第36回原子力規制委員会（平成30年10月17日）
安全の目標	Cs-137 の放出量が100TBq を超えるような事故の発生頻度は、100 万炉年に1回程度を超えないように抑制、	平成25年度第2回原子力規制委員会（平成25年4月10日） 第17回炉安審・第19回燃安審（平成30年3月30日）

ソースターム指標の現状と課題

■ TMI-2事故のように炉心損傷に至っても、放射性物質の移行経路によっては、よう素等の大気中への放出量が著しく抑制される等、ソースタームが異なる。

このため、事故シーケンス及び放出経路を分類できるレベル2PRAによって、ソースタームプロファイルの全体像を明らかにしておくことが重要である。

■ 安全評価・有効性評価、安全性向上評価、原子力災害事前対策及び安全の目標等、ソースターム指標のあり方を継続的に検討することが重要である。

その際、米国NRCの更新ソースターム（NUREG-1465）のような、「格納容器へのソースターム」の適用についても検討し、安全評価・有効性評価等に活用することが重要である。

おわりに

■ ソースタームは、事故時の緩和設備の種類・性能及び操作等の原子炉施設の固有の性能を表しており気象条件などの影響が少ない等の利点がある。

■ ソースターム評価に係る安全評価・有効性評価、安全性向上評価、緊急時、安全の目標等の分野について、これまでの技術知見を集約して課題をさらに精査し、基準類策定・整備、技術開発及び基礎・知見提供の活動に反映することが望まれる。

また、これらの活動が規制、事業者及び大学・研究機関の連携によって継続的な安全性向上の議論に繋がるよう、原子力安全部会に要の役割を期待する。