甲第220号証

過酷事故のナイトメア・シナリオ

佐藤 暁

さとう さとし
原子力情報コンサルタント

「さあさあ，お立会い。御用とお急ぎでない方は，ゆっくりと聞いておいで，見ておいで」の口上で始まる「がまの油売り」。香具師は，陳列した軟膏を，かゆみ，ひび・あかぎれ，しもやけ，さらに，梅毒，痔，虫歯にさえも効く万能薬で，特に切り傷には格段の効能を発揮し，名刀の切れ味を一時的に止めてしまう効果もあると言います。そして，大勢の観衆の前で，すっぱすっぱと紙を切り，その切れ味を示した上でがまの油を塗って切れなくなることを実証し，次に，それを拭き取ると切れ味が復活し，実際に自分の二の腕を切って出血させ，そこにがまの油を塗ると傷さえ残さず癒えるのを見せて納得させ，最後に，「今日はふだんの50% オフ」と叫び，一気に売り捌きます。

日本の原子力発電所も，がまの油を塗ったかのように，それほど変わったことをしたわけでもないのに，たちまち「世界最高水準」になりました。その口上を信ずる限り，最新鋭の第三世代の原子炉をも凌ぐ安全性を達成したかのようです。冷却材喪失事故，電源喪失，緊急炉心冷却系喪失，等々に効く万能薬。しかし，もしそれを携えて世界に出て行き，「さあさあ，お立会い」とやったとしたら，それは売れるようなものなのでしょうか？　福島事故後，今日までに欧米で発行された事故の原因と対策を述べているレポートは数多くありますが，日本から優れた対策技術の示唆を得たとは，どれにも一行も書いてはありません。

まがいものの正体は，それを作った人が一番よく知っています。また，観衆も芸を楽しんで割高の軟膏を買って帰るのであって，「がまの油」が霊薬でないことなど，実は誰でも知っています。誇大広告だと騒いでも，「野暮」と言われるだけです。香具師も精一杯のパフォーマンスを披露したのだし，売り上げがなければ元締めに叱られて可哀想ではないか，と。

日本の原子力発電所の過酷事故対策が，実は，軽い切り傷やひび・あかぎれにしか効かない「がまの油」のようなもので，特に「世界最高水準」の座に就くために考案された特殊なものでないことを，電力会社や原子力規制委員会の原子力の技術者は，本当は理解しているはずです。しかし，そんなことを言ったのでは元締めに叱られます。元締めも大元締めに叱られます。そこで私は前回から，「野暮」を覚悟で彼らに代り，つい勢いで出てしまった誇大広告の修正係を買って出ているのですが，今回は，問題の「がまの油」が，たとえ口上通りであったとしても効き目のない，福島事故より深刻な過酷事故シナリオの話をします。私は，「原子力ムラ」の一員ですから，もちろん，原子力発電のネガティブ・キャンペーンのためではありません。

実はつい最近(2014年7月24日)，米国原子力規制委員会(NRC)からの委託を受けて作業を続けてきた米国科学アカデミー(NAS)が，「米国の原子力発電所の安全性向上のための福島事故からの教訓」と題する報告書を発表しました。NASは，同報告書の第5章で，確率論的リスク評価(PRA)の問題点をいろいろ述べ，「元国会事故調査委員会の委員長だった黒川博士が語った見解」として，次の言葉を引用しています。“The problem is not how to estimate rare events, but rather how to identify events that are not rare but go unrecognized.”(問題は，稀少な事象をどう推定するかではなく，むしろ，稀少でもないのに見落とされている事象をどのように拾い上げるかである。) 米国でも使える訓戒の言葉だと感じて持ち

帰ったNASの「聴く力」はさすがですが，一方，日本の原子力関係者にとってこれは，直ぐにでも実践に移さなければならないとても重要な心構えです。しかし，……。

これまでの過酷事故評価と対策をめぐる電力事業者と原子力規制委員会(NRA)の議論は，NRAが制定した指針をベースに進められていますが，残念ながら私には，黒川博士が指摘されたリスクの摘出に対する"unrecognized(見落とし)"への警戒心が増したようには思えません。「3.11後の教訓」ではなく，むしろ「3.11前の楽観」に乗じて，新たな「安全神話」に向かっていくのをひしひしと感じます。

そこで，心ならずも「がまの油売り」のようなことをしてしまって申し訳ないと思っている友人たち，それに気付かず本物の霊薬と思い込んでいる友人たち，そして，「世界最高水準」を少しでも信じかけている読者の皆さんと，今後どのような注意深さで原子炉事故のリスクを議論していくべきか一緒に考える機会とするため，あえて少し刺激の強い話をさせていただきたいと思います。

補論：過酷事故シナリオの変遷(予備情報)

米国

米国における過酷事故評価の主な変遷を表1に示します。50年以上前の大雑把な想定シナリオから始まり，徐々に解析に基づく確率論的なシナリオの選定と，現実的な進展解析に沿った評価へと進化してきた歴史を読み取ることができます。解析には，その時代の最先端のコンピューター技術が使われてきましたが，今でも完璧ではなく，これからも変遷は続いていきます。以下，いくつか重要な点を補足します。

1990年代までの古典論　WASH-740では，格納容器のない「裸の原子炉」に内蔵された放射性物質の半分が，瞬時に粉末化して周囲に拡散するという，原爆をイメージしたような仮定をシナリオとしています。原子炉の大型化に合わせて1965年に改訂されたときには，死者数万人，資産の損害1000億ドル(現ドル価)に引き上げられています。

TID-14844は，4人の専門家チームによって作成されたものですが，この場合の仮定においては，原子炉の中から瞬時に，希ガスの100%，ヨウ素の50%，固形成分の1%が格納容器の中に放出され，その先

表1―米国における過酷事故評価の変遷

時期	発行された報告書	過酷事故シナリオの決め方と評価結果の特徴	
1957年	WASH-740 理論上可能な最悪事故	想定	◇大型商用炉の最悪シナリオ。格納容器なしと仮定。 ◇急性被曝障害による数千人の死者。
1962年	TID-14844 立地基準	想定	◇格納容器の存在を担保。 ◇敷地境界に2時間滞在しても急性障害なし。
1975年	WASH-1400 (ラスムッセン・レポート)	確率論	◇確率論的な事故シナリオ。 ◇原子炉事故，使用済燃料プール事故を評価。
1981～1982年	NUREG/CR-2182 SBOの詳細進展解析	進展解析	◇ブラウンズ・フェリー(BWR)の事故進展を解析。 ◇大量の水蒸気，H_2，CO，CO_2の発生に伴い，原子炉建屋ブローアウトが破裂して放圧。
1982年	CRAC-II 原子炉事故の規模評価	想定/解析	◇各商用炉に対して個別に評価。 ◇急性被曝障害による5万人の死者。資産損害3000億ドル(現ドル価)。
1990年	NUREG-1150 過酷事故リスク	確率論 進展解析	◇米国の代表プラント5基に対する過酷事故の発生頻度と規模を評価。
2012年	SOARCA 最新のコンピューター解析技術を駆使した過酷事故の影響評価	確率論 進展解析 交通工学	◇福島事故以前(ドラフト版)に水素爆発予想。 ◇事故シナリオの選定にSPAR，原子炉事故の進展解析にMELCOR，放射性物質の拡散にMACCS2の各最新解析モデルを適用。避難活動を担保。 ◇急性障害による死者数ゼロ。癌の影響軽微。

の環境への漏出には，格納容器の設計値である漏洩率，0.1%/日(格納容器の容積の0.1%の気体が1日あたり漏出するという意味)を仮定しています。この著しく低い漏洩率のお蔭で，敷地の外は安全であるということになっています。

これよりも悪い事態があり得ることも言及されていたのですが，日本はこれを換骨奪胎し，実際には起こり得ない「仮想事故」と呼びました。BWRプラントの仮想事故の場合，格納容器からの漏出の際には，サプレッション・プールによる除去効果があり，そうして原子炉建屋に漏れた放射性物質が，次に高性能フィルターでろ過されて環境に放出されます。そのため，実際に起り得ない仮想事故が起こった場合でさえ，環境への影響はまったく軽微なものになると太鼓判を押し，福島事故が起こるまで，設置認可が続いてきました。

ラスムッセン・レポートには，初めて確率論的リスク評価(PRA)が使われました。そして，確率は小さくても，TID-14844よりも厳しい原子炉事故が，唐突な仮定としてではなく，ある進展シナリオに沿って現実的に起こり得ることが示されました。格納容器の損傷パターンとしては，水蒸気爆発で原子炉容器の上蓋が飛ばされ，その衝撃によって生じるアルファ(α)から，過剰な内圧上昇によってシール部から大量(2400%/日)に漏洩するゼータ(ζ)まで，6種類が述べられています。

それからまだ間もない1979年，スリー・マイル・アイランド(TMI)事故が発生し，過酷事故が現実のものとなりました。このとき，格納容器内では水素の爆燃も発生していたのですが，爆圧が197 kPaと低く，損傷には至りませんでした。しかし，これを機にBWRのマークIとIIの格納容器には，運転中，窒素ガスを充満させておくことが規制要件(10CFR50.44)として追加されました。

ブラウンズ・フェリーに対するSBO(全交流電源喪失による事故進展)解析は，オークリッジ国立研究所によって行われ，事故の進展で発生する大量のガスの圧力で原子炉建屋最上階が壊れるところまでは予想していますが，それが水素爆発によるものと考えられてはいません。

CRAC-IIによっては，安全神話で安穏としていた日本を除く米国内外で衝撃が走りました。これは，今の日本のSPEEDIの原初的な解析コードの名称でもあり，原子炉から環境に放出された放射性物質が，周辺住民と環境にどのような影響を及ぼすかを計算します。

以上までの発展が一応集大成され，1990年のNUREG-1150となります。事故の進展シナリオは，複数の解析コードを連動させて決められますが，まだ完成度はかなり低かったと言わざるを得ません。その後しばらく経ってから，NRCはSOARCAというプロジェクトを立ち上げるのですが，ここまでのところを一区切りとし，「古典論」と呼ぶことにします。

最新の解析：SOARCAへ　2002年，NRCは，それまで蓄えられてきた過酷事故に関する主要な知見を，職員向けの研修テキスト(NUREG/CR-6042)としてまとめました。その中では，原子炉容器内外での水蒸気爆発(α, β)，原子炉容器からの溶融物の高圧噴射(HPME)，溶融物とコンクリートの反応(MCCI)，原子炉容器と格納容器の損傷の様態，水素爆発など重要なテーマが，膨大な過去の研究成果をもとに詳細に解説されています。

SOARCAは，「古典論」に替わる最新の事故進展解析です。米国内のBWR，PWRの各代表プラントに適用され，2010年10月，その報告書のドラフト版が発行されました。事故の起因事象の選定にはPRAコードのSPAR，事故進展にはMELCORと呼ばれる解析コード群，外部環境での拡散にはMACCS2が使われています。BWRにもPWRにも，SBOが起因事象に選ばれ，BWRでは，格納容器から原子炉建屋に漏れた水素が爆燃を起こし，最上階のブローアウト・パネルと天井が爆圧で壊され，大物搬入口の扉がこじ開けられると予想しています。4カ月半後，この予想が福島で現実となりました。報告書では，最地階(トーラス室)での爆燃も予想していましたが，福島では免れました。

使用済燃料プールのリスク　遡りますが，前掲のラスムッセン・レポートは，使用済燃料プールの水が抜ける過酷事故についても言及し，そのリスクについて，原子炉の過酷事故に比べ十分小さいと評価しました。しかし，すぐに事情が変化します。使用済燃料の再処理禁止が決定され，プール内の貯蔵量の増加が予想されるようになり，その対応として，貯蔵ラックの稠密化が進められつつあったからです。1979年のサンデ

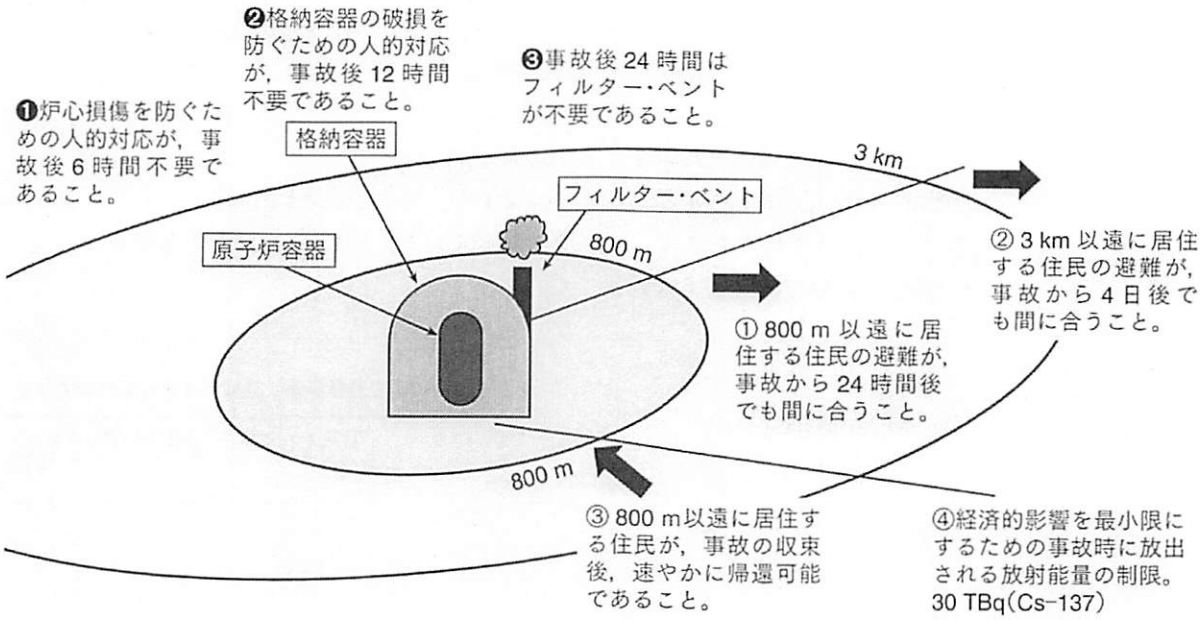


図1―EURに規定されている「人道的」な基準

ィア国立研究所の報告書(NUREG/CR-0649)には，プール水が抜けた場合でも空冷で十分な除熱が可能となるためには，その前に10日から数年の冷却期間が必要と述べられています。その後この見解は，高度化された計算コードを用いて再評価され，1989年の報告書(NUREG-1353)でも，やはり900℃までのオーバー・ヒートでジルコニウム火災が発生する可能性が繰り返し指摘されています。

使用済燃料プールの過酷事故リスクは，2001年の「9.11テロ」で，再び注目されるようになりました。2006年のNASの報告書は，原子炉から取り出したばかりの発熱量の高い使用済燃料を，市松模様に分散することを勧告しています。ユッカ・マウンテン計画の撤廃に伴って，使用済燃料の最終処分の検討をオバマ大統領とチューDOE(エネルギー省)長官から託されたブルーリボン委員会は，2012年の最終答申で，急遽福島事故の教訓を盛り込み，使用済燃料を早めに貯蔵プールから搬出し，乾式キャスクに貯蔵することを提言しています。

欧州

欧州の過酷事故評価と対策は，独自の思想の下で進化してきました。つまり，米国が1レム(=10 mSv)を2000ドルで換算した「費用対効果」を一つの採否基準としているのに対し，欧州では，より人道的な自国と隣国の人々への思い遣りが根底にあるように感じられます。フィルター・ベントはその好例です。これは，BWRかPWRかの炉型も，地震リスクの高低も問わず，福島事故以前から，欧州ではほとんどのプラントに設置されていました。それらの中でもTMI事故の直後，最初にこれを導入したのはスウェーデンのバーセベック原子力発電所でしたが，それは，デンマークの首都，コペンハーゲンまで20 kmの地点に立地されていたからでした。万一事故が発生した場合でも，放出される放射能の量を最小限に抑える誠意を実際の行動として示すのが目的でした。ただし，同発電所はどのみち間もなく永久停止しています。

原子炉容器底部からの「メルトスルー」に対しては，水プールを設けてこれを受けるという概念の有効性に懸念を持ち続け，今でも解析や実験を繰り返しています。そして，これに対するより適切な対策として，「コア・キャッチャー」の研究が1990年代中頃から始められ，新設炉の設計基準(EUR)の2001年版(Rev. C)に盛り込まれています。これは，人手や動力によらず(パッシブ設計)，水素の発生や水蒸気爆発のような危険性を伴わないものという設計思想にもとづくものです。

EURでは，図1に示すように，事故時の放射性物質の放出から周辺住民の生命と健康，生活を守るため，放出量に対する制限(①～④)が，さらに，プラント職員が，事故時の対応において，過度な危険を冒す必要がないよう時間制限(❶～❸)が，プラント設計の要件

として規定されています。

欧州の原子力安全の根底には，人(周辺住民はもちろん，プラント運転員も)の尊重が絶対的なものとしてあり，米国の功利主義を超えた哲学と日本の基準との次元の違いを感じます。さらに，そのような人道的レベルと慎重さの他，しばしば技術的にも瞠目させられます。1980年代，設備利用率の低迷が続いていた原子力大国の米国が学習に訪れたのは，人口530万人のフィンランドでしたが，調査隊のメンバーだった私の知人は，すっかり自信を失って帰国しました。実は，原子炉建屋の水素爆発に対しても，同国ではすでに2000年にはそのリスクを認識し，爆発の威力に対する解析まで行っていて，その論文(NKS-9)を発表していました。

① SOARCA vs. 福島事故のナイトメア

事故シナリオは徐々に現実的なものへと修正されてきました。その最先端がSOARCAです。したがって，今さら「古典論」を持ち出して，皆さんを脅かそうというのではありません。後述するナイトメア・シナリオは，そのSOARCAと福島事故の現実などにもとづいて考察し，私が不安を抱き，電力事業者とNRAの専門家にも，真剣に検討してほしいと思っているものなのです。

1.1 最新の原子炉事故進展解析(SOARCA)

SOARCAではまず，確率論的評価(PRA)によって，炉心損傷への寄与が10^{-6}/年未満(発生頻度が100万年に1回未満)である起因事象を排除しています。ただし，影響がより深刻な格納容器の損傷やバイパスに至る起因事象に関しては10^{-7}/年(1000万年に1回)まで広げます。過酷事故対応として導入された可搬式設備に依存した人的対応は期待しません。

そのようにして選定された起因事象が，表2に示されます。

LT-SBOとは，敷地を襲った地震が，設計加速度を超えはするものの，直流電源設備，原子炉隔離時冷却系(RCIC：BWRの場合)，補助給水系(AFW：PWRの場合)は損壊を免れ，バッテリーが消耗するまでの間，炉心冷却のために働き続けることが期待される全交流電源喪失事象(SBO)です。それに対してST-SBOでは，激甚な地震を想定し，直流電源もRCIC，AFWも働かなくなり，直ちに炉心が冷却機能を失うSBOです。

表2—SOARCAで進展評価に選ばれた過酷事故シナリオ

プラント名	選定された事象	発生頻度(/炉年)
BWR ピーチ・ボトム	LT-SBO	3×10^{-6}
	ST-SBO	3×10^{-7}
PWR サマー	LT-SBO	2×10^{-5}
	ST-SBO	2×10^{-6}
	TI-SGTR	4×10^{-7}
	IS-LOCA(参考)	3×10^{-8}

注記
LT-SBO(Long-Term Station Blackout)
ST-SBO(Short-Term SBO)
TI-SGTR (Thermally-Induced Steam Generator Tube Rupture)
IS-LOCA(Interfacing System Loss-Of-Coolant Accident)

TI-SGTRとは，空焚きになった原子炉容器からの高温ガスが蒸気発生器の細管を対流するうちに高温クリープによる破損を起こさせ，二次系に流出した放射能ガスが，開固着した主蒸気逃し安全弁の排気管から外部環境に放出されるという現象です(図2)。IS-LOCAとは，高圧系と低圧系の境界にある弁が漏洩することで，格納容器の外側にある設計圧力の低い系統を破損させる形態の冷却材喪失事故(LOCA)です。TI-SGTRとIS-LOCAは，格納容器バイパスと称されます。

以上のそれぞれの起因事象に対するSOARCAの解析結果は，「古典論」と比べてかなり軽いものとなっています。まず放射性物質(Cs-137)の放出量が数十分の1となっています。さらに，放出が始まるまでの時間的猶予を利用し，EPZ(半径10マイル，約16 km)外への避難を終えることが可能であることから，被曝による急性障害の発生数はゼロとなります。発癌リスクの増加率さえ自然発生率のせいぜい1万分の1オーダーで，事故の発生頻度を乗ずれば，EPZ内にいるある個人が，

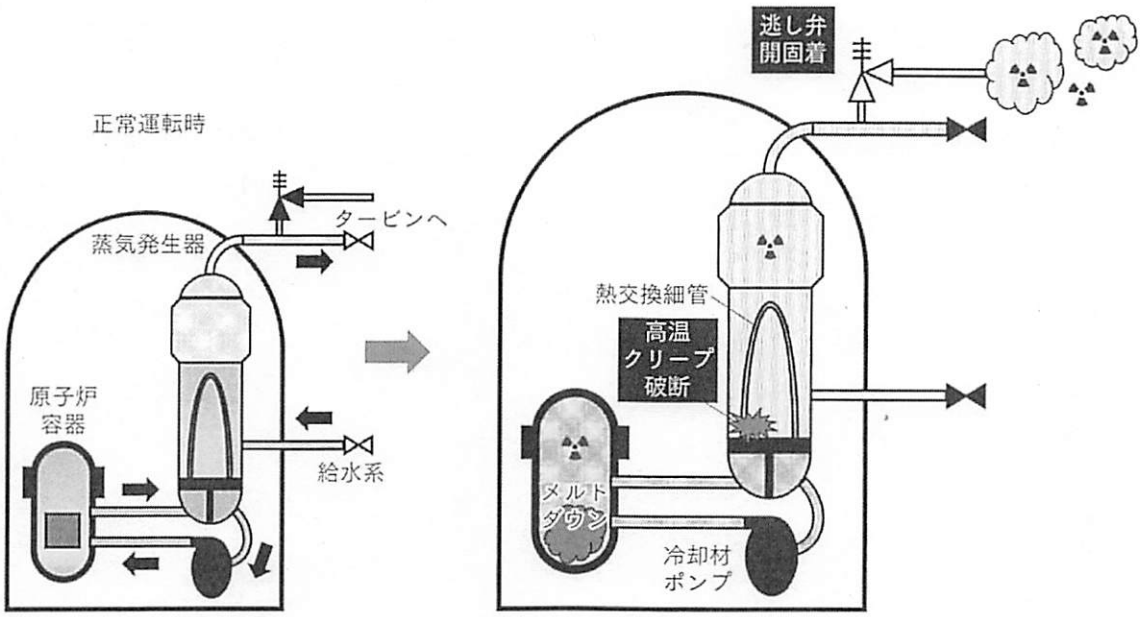


図2―TI-SGTRの発生メカニズム

原子炉事故が原因で癌にかかって死亡する頻度は，100億年に1回のオーダーに過ぎないことになります。

結局，原子炉事故で数千人から数万人が死ぬというのは昔の迷信で，周辺住民の生命が脅かされるリスクは実質ゼロというのがSOARCAの最終的な結論だということでしょうか。そうであるとしても，後述する理由により，少なくとも日本にはこれがあてはまりません。

1.2 福島事故

2011年3月12日に発生した福島第一1号機の原子炉建屋の水素爆発は，その4カ月半前に発行されたSOARCAのドラフト版で予言されていましたが，不覚にも私は，それまでこれを読んでおらず，2000年のフィンランドのレポート(前出補論末尾参照)のことも知りませんでした。骨だけになった原子炉建屋最上階のテレビ映像に，ナイトメアだと感じました。起こってしまえば，どんな進展をたどってあのような現象に至ったのかおおよその見当がつきますが，事前にあれほどの大爆発を予想していた専門家は，日本の産・官・学にはいなかったと思います。

3月14日の3号機の水素爆発は，「想定内」となってしまいました。しかし，その翌日に発生した4号機の水素爆発は，その後しばらく原因がわからず，使用済燃料プールからの漏水によるオーバーヒートで生じたものと推測し，ジルコニウム火災による大量の放射能エアロゾルの放散を心配したNRCは，50マイル(約80 km)圏内に在住の米国民に避難を呼びかけました。このときNRC内では，「日本は(燃料配置の)市松模様をやっていないのか？」，「知っているのかどうかもわからない」，といった短いやり取りがありました。日本では，当時原子力委員会の委員長だった近藤駿介氏が主導して放射能エアロゾルの拡散を計算し，結果を受け取った一部の政府関係者たちの間で，「首都圏も危ない」というナイトメアとなったようです。現実とならずに済みましたが。

2 BWRプラントのナイトメア・シナリオ

読者の皆さんは，以上の二つのナイトメア(水素爆発，ジルコニウム火災)に対しては，当然，根本的対策が講じられたと思っていることでしょう。今やNRAは，次の三つの重大な起因事象が重複して起こっても耐えしのげるよう求め，電力事業者は，その要求に適合できると豪語しているのですから。

大破断冷却剤喪失(LOCA)
＋全交流電源喪失(SBO)

＋全非常用炉心冷却装置(ECCS)喪失

大破断LOCAはSOARCAにも含まれていませんが，それはなぜでしょうか？　強い地震の少ない米国東部では，設計地震加速度を10万年に1回の頻度で設定しても，せいぜい0.25 g(245ガル)以下となります。そのため，SOARCAのLT-SBOで仮定した地震加速度は0.3～0.5 g(294～490ガル)で，ST-SBOでさえ0.5～1.0 g(490～981ガル)です。したがって，大破断LOCAの起こるようなさらに巨大な地震の発生頻度は，SOARCAでは切り捨てられることになります。

しかし，設計地震加速度の超過が，「日常茶飯事」のように多発してきた日本においては，この理屈があてはまりません。ここのところ段階的に引き上げてきたとは言え，十分であるという技術的根拠が今も欠落しているため，大破断LOCAは，日本においては欠かせない補完的仮定とならざるを得ないのだと考えられます。そして，大破断LOCAが起こるほどの巨大地震であれば，必然的にSBOが付随し，SBOが起こればECCSの喪失が伴います。したがって，「三つの重大な起因事象が重複」と上には述べましたが，これらは，独立事象の偶発的な重複なのではなく，単に一つの巨大地震による併発・誘発事象とみなすべきなのです。否，実はむしろ，「エッ，たった三つだけ？」と問うべきところでしょう。地震に誘発される事象には，火災や内部溢水などもあり，それらはさらに別の事象を誘発していくはずだからです。

では，NASが取り上げた黒川博士の言葉「稀少でもないのに見落とされている事象」を思い出し，そのような可能性のあるシナリオを二例考察してみましょう。

2.1　シナリオ(1)：HPMEによる格納容器破損

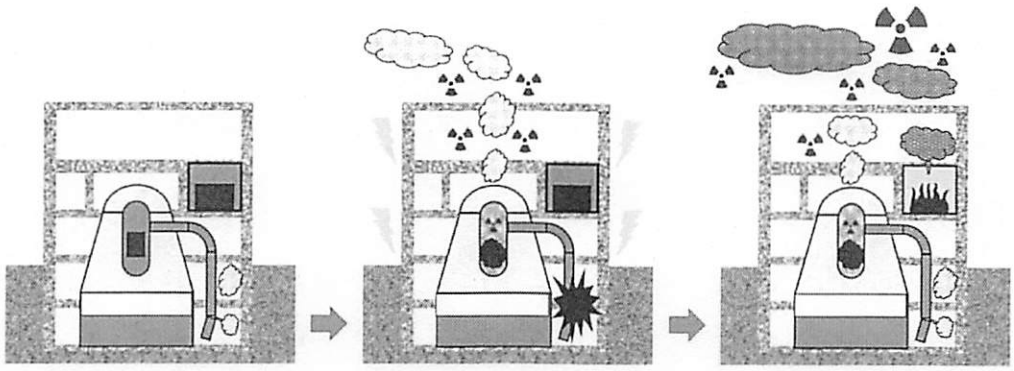
BWRの原子炉容器底部には，直径5～6.5 cmほどの炭素鋼製の配管が付いており，運転中は常に溶存酸素濃度の低い水が高速で流れ，流動加速腐食(FAC)の現象が懸念されることから，米国では，特殊な装置を開発して減肉の検査が行われています。大口径LOCAが1回発生する前に，このような配管は数百～数千回破断する可能性があります。

この配管が地震の衝撃によって破断し，SBOとECCS喪失が生じたとします。さらに，SOARCAにおけるST-SBOの初期条件に倣い，直流電源が喪失し，RCICも使えないと仮定します。これらが，特に強引で非現実的な仮定ではないと同意してもらえると思います。さてこの先，事故はどのように進展していくことになるでしょうか？

ポイントは，この配管の取り付け位置が，原子炉容器の最下部だということです。配管からは，原子炉容器の残水がなくなる最後まで，蒸気としてではなく水として排出されます。同じ重量の水と蒸気が排出される場合を比較すると，エネルギーの流出としては，圧倒的に前者が少なく，その分，原子炉容器内にエネルギーが留まります。それが，炉心溶融と溶融物の温度上昇に費やされることになり，破断した容器底部の配管からは，高圧で溶融物が噴出されることが予想されます。これがHPMEと呼ばれる現象で，格納容器を損傷させる可能性が懸念されます。そして，格納容器が損傷されると，サプレッション・プールもフィルター・ベントも役に立たなくなり，大量の放射性物質が直に外部環境に放出されることになります。この事故の進展はかなり速く，周辺住民の避難が間に合いません。後半には原子炉の水位も監視不能となりますので，進行状況が把握できず，不意打ちのように発生します。当然，原子炉建屋は入域不可能となり，当分の間，収束作業に着手さえできません。

2.2　シナリオ(2)：水素爆発とジルコニウム火災によるダブル・ナイトメア

地震によって，格納容器の外側(原子炉建屋地階)のRCIC系蒸気配管が破損したとします。原子炉スクラム，原子炉隔離に続いてRCICが起動した途端に，SBOと直流電源喪失が発生した場合，続いてどんなことが起こっていくでしょうか。



RCIC 蒸気配管が破損し，蒸気噴出。

空焚き，炉心損傷に続いて，希ガス，ヨウ素，水素が流出。地階で水素爆発。燃料プール破損。

燃料プール内の使用済燃料がオーバーヒート。ジルコニウム火災発生。粉塵化して気中に飛散。

図3―水素爆発とジルコニウム火災によるダブル・ナイトメアの発生シーケンス

このような初期条件も，地震という一つの起因事象によって生じる可能性があります。

蒸気配管の破損部からは，蒸気が流出し続けます。本来はその異常を検知して，格納容器の電動隔離弁(内側が交流電源，外側が直流電源)が自動的に閉止するはずですが，両電源を喪失したことで隔離ができず，蒸気が出続けます。蒸気の熱で現場への接近は困難ですが，その間にも原子炉水位が低下していき，直に空焚きが始まり，炉心損傷が進行していきます。その結果，原子炉建屋地階で噴出が続く蒸気には，放射性の希ガスやヨウ素が混じるようになり，これで原子炉建屋への入域は不可能となります。格納容器がバイパスされ，直接原子炉容器から原子炉建屋へ，原子炉建屋から(開放されたブローアウト・パネルの開口部を経て)外部環境へと放射性物質の放出が行われるようになります。

さらに炉心損傷が進行し，蒸気には，大量の水素ガスが含まれるようになります。蒸気が冷却された空間では，相対的に水素の分圧が増加し，周囲の空気との混合によって爆発条件ができあがり，原子炉建屋の地階で大規模な水素爆発が発生します。最上階での爆発と異なり，爆発のエネルギーはより効率的に建屋の震動，そして損傷に使われます。それが十分に強力な場合には，使用済燃料プールの内張りに裂傷を与え，プール水が抜けていきます。プールへの水の補給もスプレー冷却もできないまま，「市松模様」が運用されていない使用済燃料はオーバーヒートし，ついにジルコニウム火災が始まります。ジルコニウムの酸化は発熱反応ですので，火勢が増し，プール内で延焼していきます。これも，収束させるのが困難な事態です。このように，水素爆発がジルコニウム火災を誘発するというダブル・ナイトメア・シナリオが考えられます(図3)。

飛躍し過ぎでしょうか？　原子炉建屋地階での水素爆発は，福島では起こらなかったようですが，SOARCA の解析では予想されています。また，未検証ではありますが，福島第一1号機では，原子炉建屋の最上階だけでなく，その下階でも別の爆発があったことを示唆する状況が観察され，2000年のフィンランドのレポート(NKS-9)に照らしても十分想定されます。

使用済燃料プールの損傷については，米国では，使用済燃料の乾式キャスクによる保管への加速を勧めるブルーリボン委員会からの提言もあり，翌2013年，NRC がその強度的な信頼性を解析し，乾式キャスクに劣らないことを確認したことにはなっていますが，これも格段に地震加速度の低い米国においての話です。日本の場合に置き換えて同様の評価を行った場合は，むしろかなり顕著なリスクが懸念されます。日本の古い原子炉建屋は，米国東海岸のものと同じくらい低い設計地震加速度で建てられており，その後の設計基準値の引き上げにより，配管など内部に設置された機器の耐

震性は強化されていますが，躯体はそのままです。過去の地震による建屋のひび割れも確認されており，地震と爆発によって過大な変位が生じた場合には，薄いステンレス鋼版の内張りが裂傷を起こす可能性が現実的となります。

しかも，建屋のひび割れが地階での爆発によって悪化すれば，地下水の流入量が増すため，現在も福島で続いている汚染水対策の困難は，さらに増す可能性があります。特に地階が5階分もある柏崎刈羽原子力発電所の場合には，その深さゆえに，遮水も一段と難しくなるでしょう。

PWRプラントのナイトメア・シナリオ

福島事故の後，PWRを運転している日本の電力事業者は，事故はBWRだったから発生したのであると言いたげな説明をしていました。世界のPWRプラントが，皆，積極的に福島の教訓を活かそうとしている中，さすがに恥じ入ったのか，直にこの点を強調しなくなってはいったものの，実は内心そのような誤った確信があるのではないかと心配されます。ここでも見落としの可能性のあるシナリオを二例だけ掲げてみます。良かれと判断して行う原子炉容器や蒸気発生器への注水が，思わぬ事態の悪化を引き起こす可能性があることを示しています。

3.1 シナリオ(1):原子炉容器内での水素爆発

大破断LOCAが発生すれば，原子炉容器と格納容器は均圧になります。そのとき原子炉に注水をすると何が起こるでしょうか。原子炉容器内の温度が低下し減圧します。すると，格納容器の空気が，破断部から原子炉容器内に吸い込まれることになります。そして，爆発条件を満たす水素，水蒸気，空気の分圧比に達したところで，爆発が発生します。原子炉容器内には発火点となるのに十分高温な「ホット・スポット」があり，使用済燃料には核分裂によって発生した白金族が数百kgも混じっており，その触媒効果によって発火を促します。

実は，このように原子炉容器内に空気が流入することの危険性は，SOARCAでも言及されています。原子炉に注水しなければよいだけだと考えられるかもしれませんが，不可知な事故の進展状況においては，注水することを望ましい措置と判断してしまうシチュエーションも排除できません。原子炉容器の爆発。それは，ラスムッセン・レポートにあった格納容器破損パターンのアルファ(α)に相当し，水蒸気爆発が水素爆発に置き換わったものです。

さらにSOARCAには，格納容器スプレーを運転することの危険性についても注意が述べられています。水素濃度が格納容器内全体で均一にならず，局部的に高いところが形成される場合には爆発が起こる可能性があります。その際，水素濃度の微妙な違いによって，TMI事故のときの爆燃から格段に破壊力が増す爆轟に変わり，格納容器を破壊に至らしめるかもしれません。イグナイターを自主的に設置することを提案している電力事業者もありますが，1980年代初めの米国で，その危険性をめぐって議論があったことも思い出すべきでしょう。

3.2 シナリオ(2):不用意な海水注入によるTI-SGTRの促進と悪化

日本の原子力発電所の場合，地震が引き金となった過酷事故対応に充てることが可能な淡水の容量には限りがあります。そのようなタンクの耐震性が低いためです。そこで海水注入がバックアップとなっているわけなのですが，原子炉容器，蒸気発生器の二次側，使用済燃料プールに対してと，用途を構わずすべてにこれが使えると考えているようです。

しかし，海水注入が塩分の析出を生じさせた場合には，流路の閉塞，金属融点の降下，伝熱の阻害といった悪影響が考えられます。中でも特に心配されるのが，蒸気発生器二次側への海水注入です。注入された海水は，蒸発して塩分濃度が上昇し，やがて細管の外表面に塩が析出していきます。析出した塩は断熱材として振る舞います。

表3—環境に放出される放射能量の推定値(単位：TBq)

		ピーチ・ボトム(BWR)			サリー(PWR)		
		I-131	Cs-134	Cs-137	I-131	Cs-134	Cs-137
炉内内蔵量		3,380,000	361,000	374,000	2,780,000	432,000	305,000
CRAC-II(古典論)		2,264,600	162,450	168,300	1,862,600	194,400	137,250
SOARCA	ST-SBO	388,700	6,137	6,358	16,680	432	305
	TI-SGTR	(該当せず)			25,020	1,728	1,220
ナイトメア・シナリオ		☠	☠	☠	☠	☠	☠
NRAの基準				100			100
電力事業者による評価		?	?	?	?	?	?

SOARCAによれば，PWRにおけるST-SBOでは，原子炉容器内で炉心溶融が発生した後，高温の放射能ガスが蒸気発生器の細管を含む一次系ループを対流するようになります。そして，高温クリープによって細管が破断します。このあと高温の放射能ガスは，蒸気発生器の二次側に充満しますが，この状態に主蒸気逃し安全弁の開固着を重ね合わせた場合が，TI-SGTRと称される事象になります。SOARCAには，このとき破断する細管の本数が，1本から2本に増えることで，開固着した弁を経て外部環境に放出される放射能量が顕著に増加する状況が示されています。

しかし，塩の析出が断熱材となった細管の場合には，破断が1,2本では収まらず，さらに多数が同時，あるいは順次，破断する可能性が考えられます。

④ 原子力防災計画への反映

今回述べたナイトメア・シナリオは，NRAが指定した起因事象と比べ，稀少でもないのに見落とされている可能性のある他の事故シナリオのうち，特に厳しい影響をもたらす恐れのあるものの具体例です。さらに過酷な事故シナリオもないとは言い切れませんが，以下の特徴が抽出されます。

- 事故発生から外部環境への放出までの時間が著しく短く，人的対応と避難行動に時間的猶予がない。
- 人的対応のための原子炉建屋への入域が，著しく困難か不可能になる。
- 外部環境に放出される量が著しく膨大。格納容器がバイパスされ，サプレッション・プールやフィルター・ベントも活かされない。影響圏がより遠方まで拡大。

一般に，日本の道路交通設計は，米国よりも輸送能力において劣り，避難には余計に時間がかかるものと思われます。そして，地震によって道路，橋，トンネルが壊れ，信号機が働かなくなった場合には，一層状況が悪化します。そのような事情も考慮した場合，日本における過酷事故は，SOARCAよりむしろ，相変わらず「古典論」のほうが近いのかもしれません。

いずれにせよ，このような事故シナリオは，まずは電力事業者が自らの意思で積極的に発掘しなければならず，それぞれに対して詳細な解析と評価を行った上で，対策の要否，可否，軽微な残余のリスクとして放置することの適否などを判断する必要があります。そして，原子力規制委員会が慎重に審査し，承認をした結果が，地元の道府県と市町村に送られ，原子力防災計画の立案に用いられるべきです。断じて，「がまの油」で粉飾されたものなど送られてくるべきではありません(表3)。

執筆者紹介
佐藤 暁 さとう あきら
1957年山形県生まれ。1984年から2002年までゼネラル・エレクトリック(GE)社原子力事業部勤務。在職中，主に原子炉内部の検査や修理，改造関係の大小100以上のプロジェクトに関わる。その後，原子力情報コンサルタントとして独立。主に米国の原子力業界における最新技術，安全問題，規制情報を収集，動向分析し，提供する業務を行っている。