

巨大システムの安全性

— 福島原発事故を考える（石谷安全法則の紹介） —

Kシニア 赤木新介

1. はじめに

2011年3月11日、巨大津波に襲われた東京電力福島原子力発電所の事故は、電力供給のみならず、各方面に深刻な打撃を与えた。特に今後の原子力発電における経済的損失に加えて安全問題に及ぼす影響も甚大である。これに関連してマスコミなどにおいて、各種の報道が流布しているが、ここではこれらと少し視点を変えて、若干ながら科学的な視点からこの問題を取上げることにする。

この視点は、大阪大学名誉教授の石谷先生によるもので、かつて石谷先生がスリーマイル島原発*¹⁾や、旧ソ連のツェルノブイリ原発*²⁾の事故に関して論じられたもの^{1, 2)}を参照し、安全の理論的取り扱いを中心に紹介するものである。

2. 原子力発電と巨大システム

2.1 巨大システム³⁾ 原発は巨大システムである。巨大システムとは、文字どおり巨大なサイズのシステムである。例えば、明石大橋は長さ3910m、重さ20万トンあり、巨大である。しかし複雑ではなく、したがってシステムではない。また乗用車のエンジンは複雑な機械要素からなり、システムではあるが巨大ではない。これらに対し、原子力発電システムは”巨大で複雑”であり、まさに”巨大システム”である。ここではこれを対象にする。

2.2 原子力発電システム(BWR, PWR) 原子力発電システムは、図1のように原子炉の中でウランまたはプルトニウムが核分裂する際に発生する熱エネルギーを取り出し、蒸気タービンに導いて動力に換える。炉の減速材に軽水を使う軽水炉の場合、圧力をかけない沸騰水炉（BWR）と、圧力をかける加圧水炉（PWR）に分かれる（図1）。

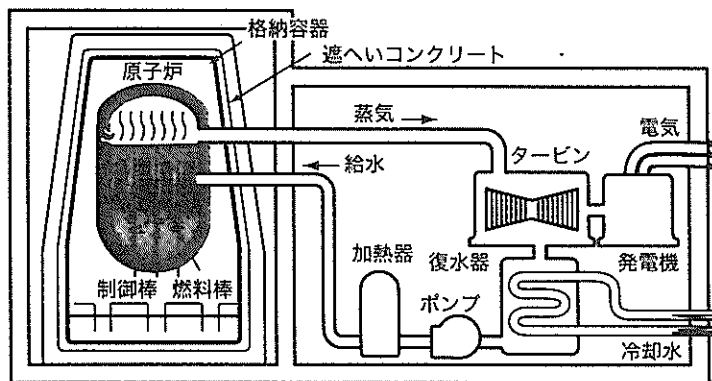
2.3 未成熟系の原子力技術 今回は、このような巨大システムである原子力技術が対象であるが、トラブルが続き、今回のような大事故に至った。このような現在の原子力の問題点を一言で云えば、スケールアップを急ぎ過ぎて製品として未成熟であると云えるであろう⁴⁾。逆に云えば、この種の新規技術は、“初期拡散⁴⁾”によってあらゆるコンセプトが俎上にあげられ、評価を受けることが大切である。

2.4 原子力発電の安全対策

(1) 原子炉の潜在的危険性 原子炉は潜在的に危険性を持っている。云うまでもなく、核分裂生成物が放射能をもち、同時に発熱する。さらに原子炉が停止した後も停止直後において運転中の出力の7%、2時間後に1%、1日後に0.5%程度の崩壊熱を出す。つまり停止させるには、常時冷却が必要である。

(2) 放射能閉じ込め対策 溜まってくる大量の放射性物質を、外に漏れないように閉じ

沸騰水炉の場合



加圧水炉の場合

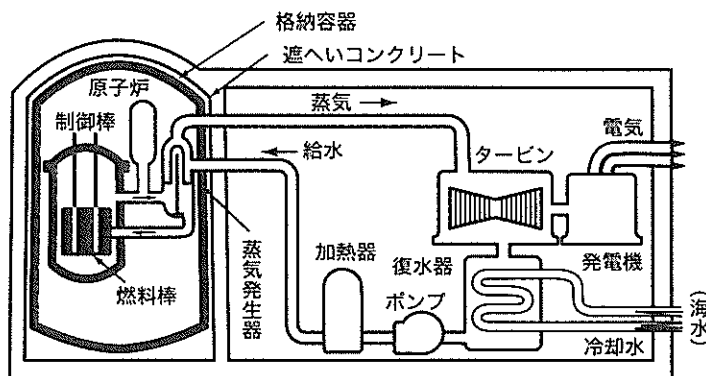


図1 原子力発電所の仕組み⁴⁾ (沸騰水炉と加圧水炉)

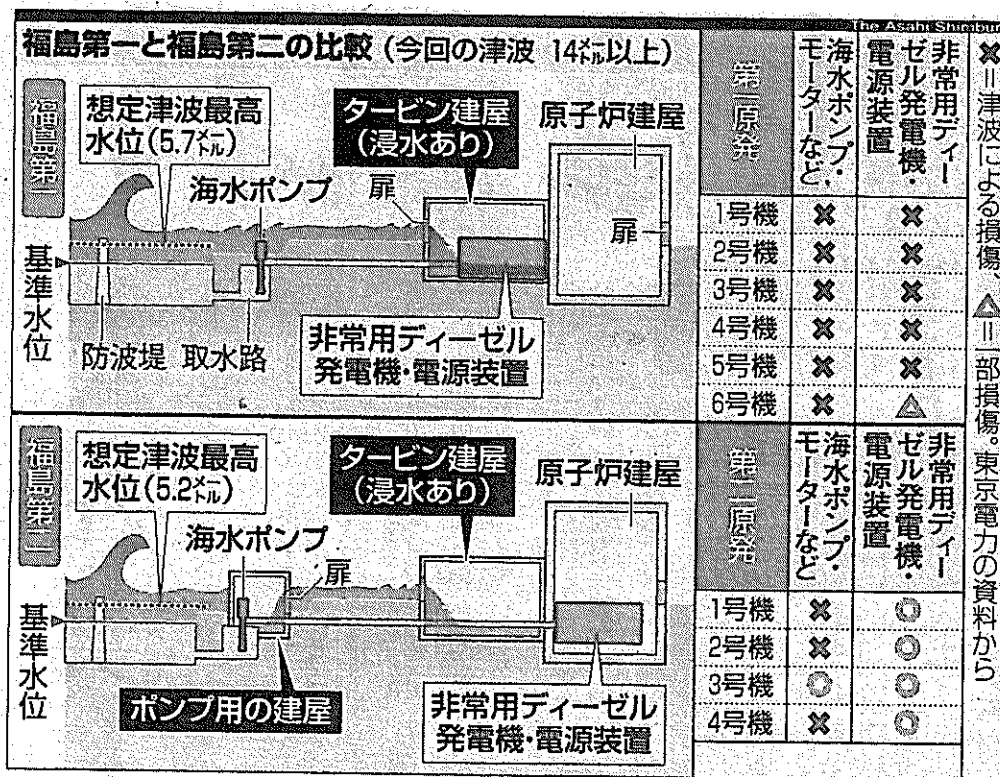


図2 福島第一と第二における事故比較 —非常用ディーゼルの冠水の有無 (朝日新聞 2011年4月6日による)

込めることが必要である。

(3) 非常用炉心冷却装置 (ECCS) 万一の放射能もれに対抗して、防護が必要である。さらに炉内の水が流失することを防ぐ必要がある。炉心を冷やすためには、高圧炉心スプレイがあって注水によって水浸しにする。

2.5 今回の福島第一原発の事故評価

事故の状況 ここで今回の事故の状況を述べておく。2011年3月11日の昼過ぎ、東北沖を震源とするM9.0の巨大地震があり、大津波が発生して宮城、福島、茨城、岩手などを中心に壊滅的な被害を与えた。これにより、福島原発も損傷する大事故となった。今回の詳しい事故原因、事故評価については、現在調査が行われており、やがて明らかになるであろう。状況を簡単に述べておく。原因は、“直接的”なものと“本質的”なものに分かれるが、“直接的”なものとしては、連日のプレス報道で取上げられているように、

- (1) 大津波を受けて非常用ディーゼル発電機が浸水し、電源喪失に至ったこと。
- (2) 上記のような原因には、非常用電源のディーゼル発電機の据付場所が気密性の高い原子炉建屋でなく、タービン建屋に置かれていたため、冠水して使用不能になったこと(図2)などがある。
- (3) さらに挙げれば、想定を上回る14mを超える大津波が襲ったこと。それらの結果として、冷却用海水ポンプの殆どが使用不能になったこと。などである。

いっぽう“本質的”な原因としては、岡本が指摘しているように(岡本洋:先人の知恵、k s k a i y uグループ掲示板による)、

- (1) 地震専門家の巨大地震(M9.0)に対する警告を無視していたこと。
- (2) 東電や原発安全の専門家のほうも謙虚に取上げなかったこと。
- (3) 津波への対策が殆ど考慮されていないこと。
- (4) 放射能災害に対する対応が希薄なこと、等々の問題があった。

2.6 チェルノブイリ原発事故との比較 今回の事故は、3大事故として、チェルノブイリ原発事故と、スリーマイル島事故と比較されることが多い。以下、まずチェルノブイリ事故を回想し、今回の福島事故と対比してみる。

- (1) 事故の状況 前述のように1986年4月26日AM1時頃、旧ソ連ウクライナのツェルノブイリ原発で2度にわたる爆発があり、火災が発生した。作業員2名が即死、放射能で汚染された粒子が流れ、放射能は日本にも飛来した。
- (2) 事故原因は、低負荷状態運転の実施であったが、コントロールを失い爆発に至った。
- (3) この原子炉は、黒鉛チャンネル炉という形式で、減速材に黒鉛を使う。燃料棒は1659本あり、どちらかというとも本来不安定な特性を持っている。冷却装置がうまく働かないとメルトダウンも起こしやすい。
- (4) 基本的には水冷方式が東電のものと異なる。

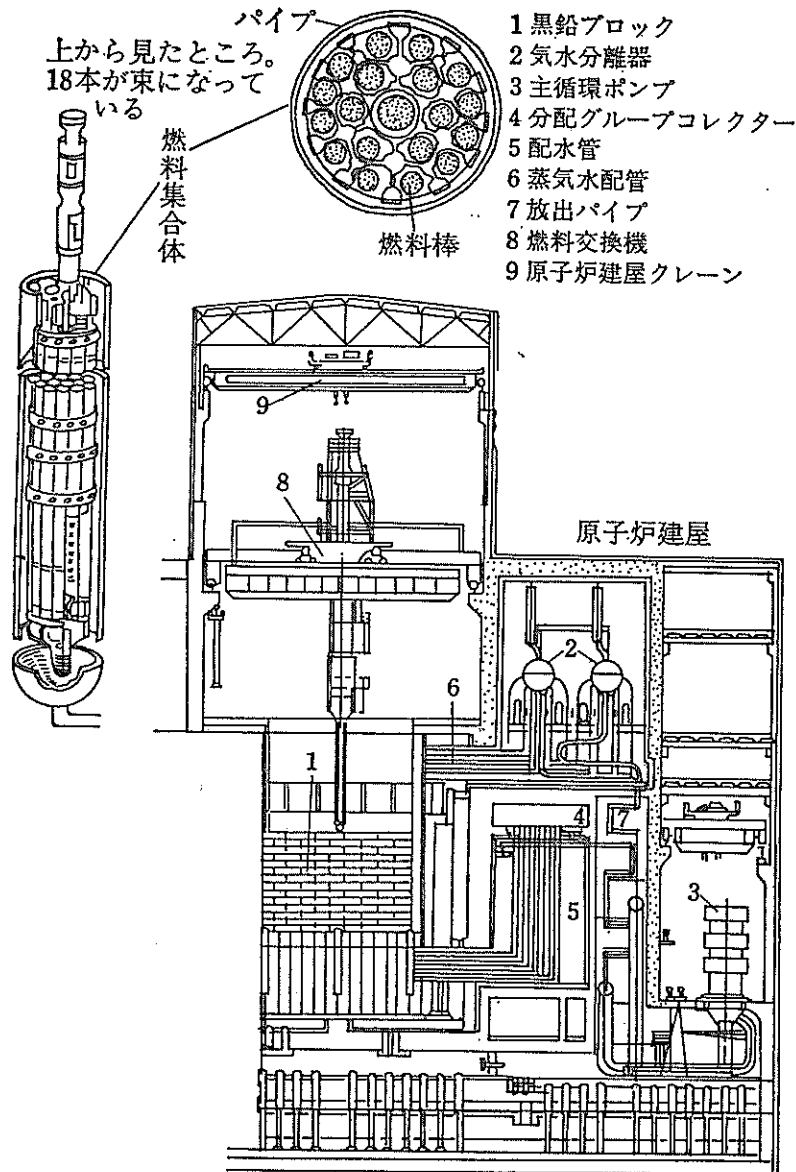


図3 チェルノブイリ原発の炉心と冷却装置³⁾

2. 7 スリーマイル島の事故 米国ペンシルベニア州のスリーマイル島の原子力発電所2号炉（加圧水型95.9万キロワット）で、1979年3月28日早朝に事故が発生した。給水ポンプが停止、タービントリップから始まり、誤操作も加わり、冷却水が減少して炉心の上部が蒸気中に露出した。死傷者は出なかったが、炉心の45%が溶融した。2号炉の復旧の目途は立たず、損失は巨額に達した。

なお、安全についての評価尺度については、IAEAよりレベル0～7（次ページ）が定められ、事故としての深刻さの度合いが規定されている。

表 1 原子力発電所の事象の国際評価尺度 (IAEA)

レベル	基準 (最も高いレベルが当該事象の評価結果となる)			参考事例
	基準 1: 所外への影響	基準 2: 所内への影響	基準 3: 深層防護の劣化	
事故	7 (深刻な事故)	放射性物質の重大な外部放出 (よう素 131 等価で数万テラベクレル) (相当以上の放射性物質の外部放出)		チェルノブイリ 事故 (1986 年)
	6 (大事故)	放射性物質のかなりの外部放出 (よう素 131 等価で数千から数万テラベ) (クレル相当の放射性物質の外部放出)	原子炉の炉心の重大な損傷	スリーマイル アイランド事故 (1979 年)
	5 (所外へのリスク を伴う事故)	放射性物質の限られた外部放出 (よう素 131 等価で数百から数千テラベ) (クレル相当の放射性物質の外部放出)	原子炉の炉心のかなりの損傷/ 従業員の致死量被ばく	JCO 臨界事故 (1999 年)
	4 (所外への大きな リスクを伴わない 事故)	放射性物質の少量の外部放出 (公衆の個人の数ミリシーベルト程) (度の被ばく)	所内の重大な放射性物質による 汚染/急性の放射線障害を生じ る従業員の被ばく	
異常な事象	3 (重大な 異常事象)	放射線物質の極めて少量の外部放出 (公衆の個人の十分の数ミリシー) (ベルト程度の被ばく)	深層防護の喪失	
	2 (異常事象)		所内のかかなりの放射性物質に よる汚染/法定の年間線量限 度を超える従業員の被ばく	美浜発電所 2 号機 蒸気発生器 伝熱管損傷 (1991 年)
	1 (逸脱)	安全上重要ではない事象		もんじゅ ナトリウム漏えい (1995 年)
尺度以下			0+ 安全に影響を 与える事象	
			0- 安全に影響を 与えない事象	
評価対象外	安全に関係しない事象			

(注) シーベルト (Sv) は、放射線が人体に与える影響を表す単位。(ミリは 1/1000) 樹木聡明: 原子力発電がよくわかる本 (平成 21-3) オーム社
 ベクレル (Bq) は、放射性物質の量を表す単位。(テラは 10¹²=1兆)

3. システム安全の基本法則

3.1 基本法則（確率）¹⁾ 一般に事故や災害（事故：死傷者なし、災害：死傷者あり）は単一原因では発生せず、二つ以上の原因が偶然重複した場合に起きるものである。また、災害の特性として大災害ほど発生頻度は少なく、小災害ほど頻度が高い。

(1) 災害の規模 表1 は、我が国の地震の度数と規模の関係を示したものである。この図の注意点は、上記のようにその規模と発生頻度が逆傾向にあることと、大災害では頻度は少ないが、被害が大きいことである。例えば、過去最大の1回の地震による死者数は、その災害の全死者数の82%占めている。（つまり今回の大震災の結果を見るまでも無く、小災害よりも大災害が恐ろしいと云える。

(2) 安全性とリスク 安全性を定量的に扱うために、リスク (risk) が定義されている。システムに故障が発生して損害が起こる場合に、リスクRを損害の規模Dと故障の発生確率Pとの積として定義する ($R=D \times P$)。Pに人身事故を問題にする場合には、それが発生する確率（危険率）をとる。リスクRを小さくするには、PまたはD、あるいはその両方を小さくすればよい。Pを小さくするには信頼性を向上することであり、Dを小さくするには、故障が発生しても大災害に拡大することを防ぐ方策をとることである。例えば原子力発電所では、システム自体の信頼性を高めるとともに、なるべく被害の少ない立地を考えることになるが、住民の反対などもあり、これはなかなか難しい問題である。

(3) 災害のデータ 上記のようなリスクを定量的に扱うには、事故の統計データを調査する必要がある。このような調査として歴史的に有名なものに、古いが表 1.1 がある。これは、1966年におけるアメリカの、各種災害に対する年間の死亡者数と死亡確率であり、リスクに関するデータの1例である。

3.2 災害の発生確率の例 災害の発生確率を表すものとして次のようなものがある。

(1) エミルボレロの 10^{-6} 則 年間の死亡事故確率として、エミルボレロが唱えた 10^{-6} 則がよく引き合いに出される。ちなみに表 4 をみると、これに近い値として、

落雷 10^{-6} 、ガン 10^{-3} となっている。

(2) ハインリヒ (Heinrich, H. W.) の法則 大災害の背後には必ず多数の小災害がある。有名なハインリヒの法則では、産業災害において“死亡”、“休業”、“不休災害”の比率は、経験的に 1:29:300 であるという。つまり1件の重大災害の防止には、300件の小災害を防ぐ必要のあることを教えるものである。

(3) リスクの許容値 どのようにリスクの許容値を定めるべきかは、重要であるが困難な問題である。原子力の分野でも多くの研究が行われてきた。

図 4 は、アメリカにおける人為災害のリスク評価の例である。横軸に災害規模（死者数）をとり、縦軸に災害の発生頻度を規模の大きい方からの累積値として示した

表1 地震の規模別度数及び累積被害分布¹⁾

死者数	度数	累積度数分布 [%]	累積被害分布 [%]
1~ 9	31	100.0	100
10~ 99	14	45.7	100
100~ 999	6	21.0	99
1000~ 9999	5	10.5	97
10000~99999	1	1.7	82

表2 災害統計 (アメリカ、1966年) と死亡確率

災害の形式	全死亡者数	年間1人当たりの死亡確率
自動車墜落	53,041	2.7×10^{-4}
火災および爆発	20,066	1.0×10^{-4}
溺死	8,084	4.0×10^{-5}
銃器毒物	5,687	2.8×10^{-5}
固体および液体ガスおよび蒸気	2,558	1.3×10^{-5}
機械	2,283	1.1×10^{-5}
水上輸送	1,648	8.2×10^{-6}
航空機	2,070	1.0×10^{-5}
食物の吸入および摂取	1,630	8.1×10^{-6}
落下物または飛来物	1,510	7.5×10^{-6}
機械的な窒息	1,464	7.3×10^{-6}
治療医学および外科学的処置	1,459	7.3×10^{-6}
鉄道	1,263	6.3×10^{-6}
電流	1,087	5.5×10^{-6}
高熱物, 腐食液, 蒸気	1,027	5.1×10^{-6}
動物(無毒)	1,026	5.1×10^{-6}
雷	408	2.0×10^{-6}
有毒動物および昆虫	131	6.6×10^{-7}
路面電車	110	5.5×10^{-7}
放射線	48	2.4×10^{-7}
	9	4.5×10^{-8}
	1	5.0×10^{-9}

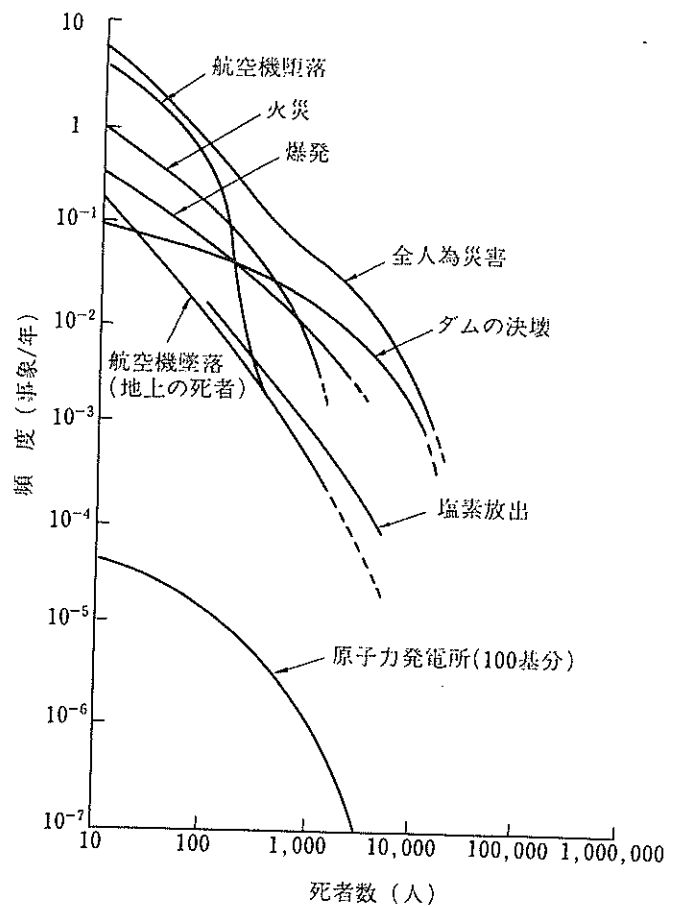


図4 アメリカにおける人為災害のリスク評価 (WASH-1400 (1975))

ものである。

この図は、通称「ラスムッセン報告」と呼ばれ、有名なものである。各種の災害のリスクは、右下がりの曲線で表され、上方に位置する曲線ほどリスクが大きい。

しかしこの図の示す値（特に原子力）は、リスクが過度に小さく、その後に起こったスリーマイル島の事故データなどが十分反映されていないという批判があることを付言しておく。

3.3 第三者検査制度¹⁾

「第三者検査制度」または「第三者検査機関」というのは、昭和57年（1982）頃、石谷先生が提唱された安全に関する指導原理である。その後、安全思想の普及につれて次第に浸透し、やがて ISO14000 シリーズにより、認証体制を確立した。「第三者」というもともとの用語は、文字の意味からすれば、「当事者でないもの」ということになるから、製作者や供給者が第一者、使用者又は購入者が第二者、それ以外が第三者ということになる。（船の分野では船級協会がこれに該当する）

文字の意味は上記のとうりであるが、システムの安全性では、技術面がさらに強調される。

ここで図 5 を見てみよう。

この図は、アメリカの年間のボイラ破裂件数の推移である。1880 年あたりから、1900 年頃に向かって大変な勢いで増えている。ところが 1901 年を境に急転して減少に転ずる。一体 1900 年に何が変わったのか。1850 年に保険会社によってボイラ検査制度が始まったが、これがボイラ破裂事故減少の牽引力となった。

これを見ると、うまく運用すると制度とか、法律などがいかに強力かに驚かされる。

原子力の分野でも、良い意味でこのような第三者検査制度の確立が望まれる。

4. 放射線と人体影響

(1) α 線、 β 線、 γ 線、中性子線が対象。 α 、 β 、 γ 線の順に透過力が増す。

遮蔽に必要な物体は、 α 線：紙 1 枚程度、 β 線：3～4 ミリのアルミ板、 γ 線：厚い鉛やコンクリート、程度である。

(2) 放射線の単位

1 ベクレル (Bq)：1 秒間に 1 個の放射性粒子を放出する能力

1 グレイ (Gy)：1kg あたり 1 ジュール吸収する放射線量

1 シーベルト (Sv)：人体に対する影響の違い。1 グレイのガンマ線（又は X 線）と同等の生物学的効果を 1 とすると、ベータ線はおなじく 1、 α 線では 20 倍、中性子線では 5～20 倍、ガンマ線や X 線と同等の効果を与える放射線量を 1 シーベルトと定義する。アルファ線では 0.05 グレイが 1 シーベルト。シーベルトが同じなら人体への生物学的影響は同じである⁴⁾。

(3) 1 人あたり毎年受ける平均放射線量

表 3 に示すように、年間 2.4 ミリシーベルトを自然放射線として受けている。

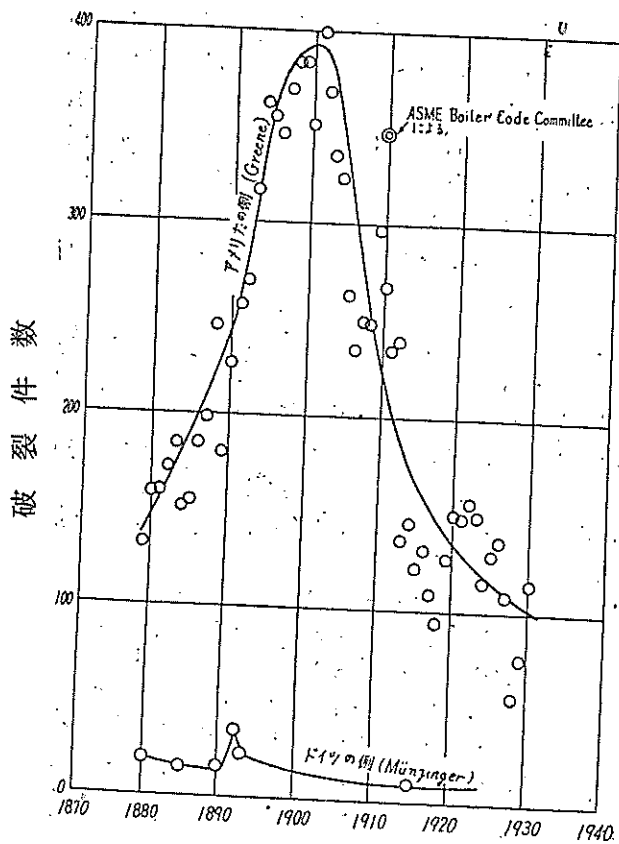


図 5 アメリカの年間ボイラ破裂件数の推移¹⁾

表 3 人類 1 人あたり毎年受ける平均放射線量⁴⁾

	放射線源	受ける放射線量 (ミリ・シーベルト)
自然放射線	宇宙線	0.35
	大地	0.40
	食物	0.35
	ラドン	1.30
	合計	2.40
人工放射線	原子力発電所	0.002

5. 信頼性解析 (FMEA, FTA など)

信頼性解析は、最終的にはリスクの許容値を定めることにあり、原子力の分野では特に重要な課題である。幸い巨大システムは、優れてシステム的特点を有し、その設計、操作などの検討には、信頼性解析の手法が有効である。

ここでは上記の手法の中、FMEA (Failure Mode Effect Analysis, 「故障モード影響解析」) と FTA (Fault Tree Analysis 「故障の木解析」) について述べておく。

FMEAはシステムを構成するサブシステムや要素が故障したとき、システム全体の故障にどのような影響が及ぶかを調べる方法である。調査は下から上へ (つまり部品レベルからシステムレベル) へのボトムアップである。この方法で、基本故障事象が直ちに判ることもある。

一方、FTAは上から下へ (トップダウン) で実施する。

次の付図1, 2は、FTAの実施例で、「付図1」は「津波による原子炉の制御不能」、「付図2」は炉心溶融 (メルトダウン)」の例である。

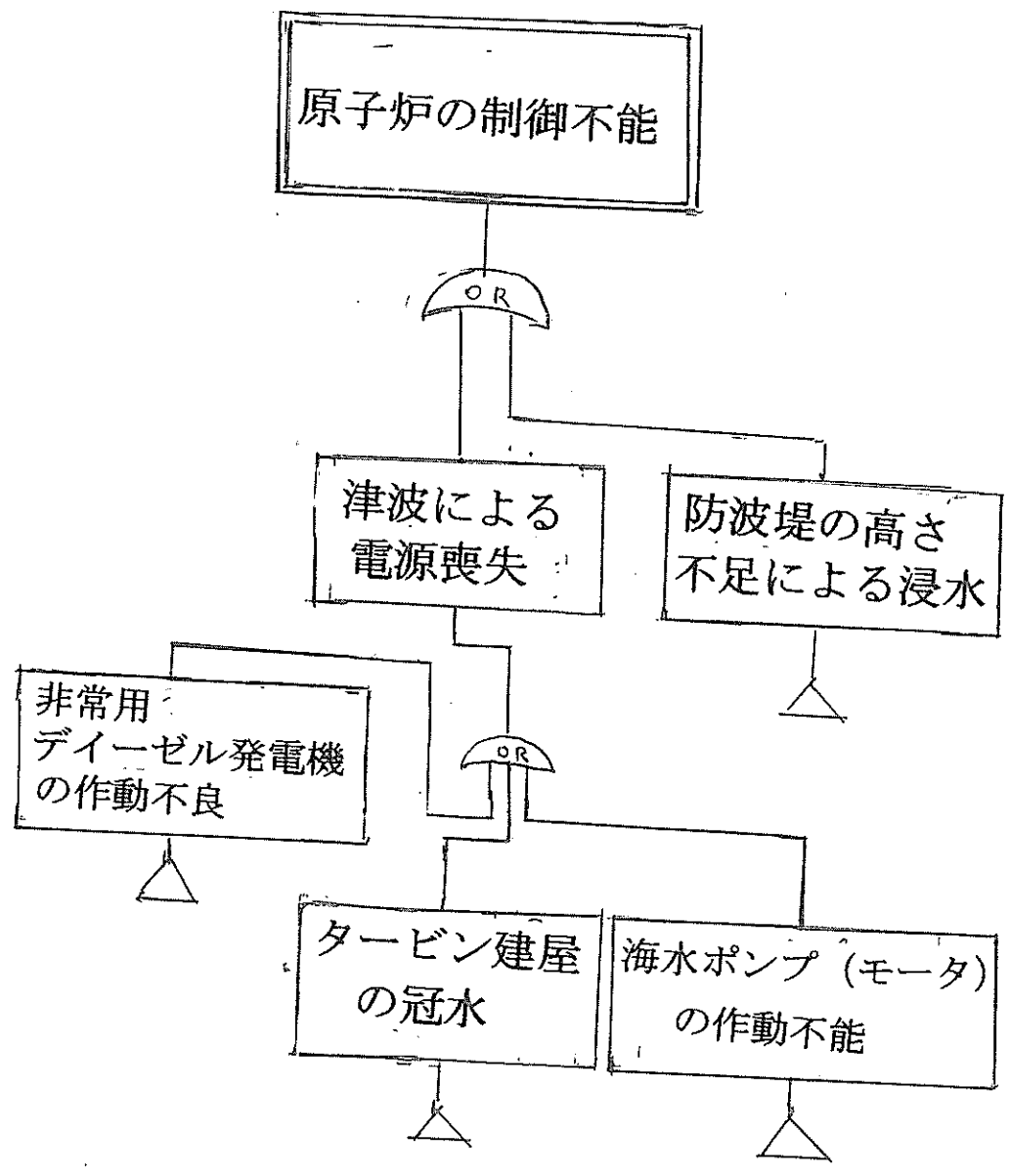
6. むすび

システムが巨大化するとシステムのもつ技術以外の側面が顕在化する。企画、設計から、製造、試験まで、広がりが増し、システムと社会との接点が益々重視されるようになる。したがって技術だけでなく、社会的な対策も含めて考えなければ解決に至らない。このことが、実は巨大システムの特徴であって、藤村氏は、このような巨大システムの持つ諸問題を”Socio-Technical Problem”と名付けておられる (藤村洋: 巨大システムの Damage-Control, kskaiyuグループ掲示板) が、全く同感である。

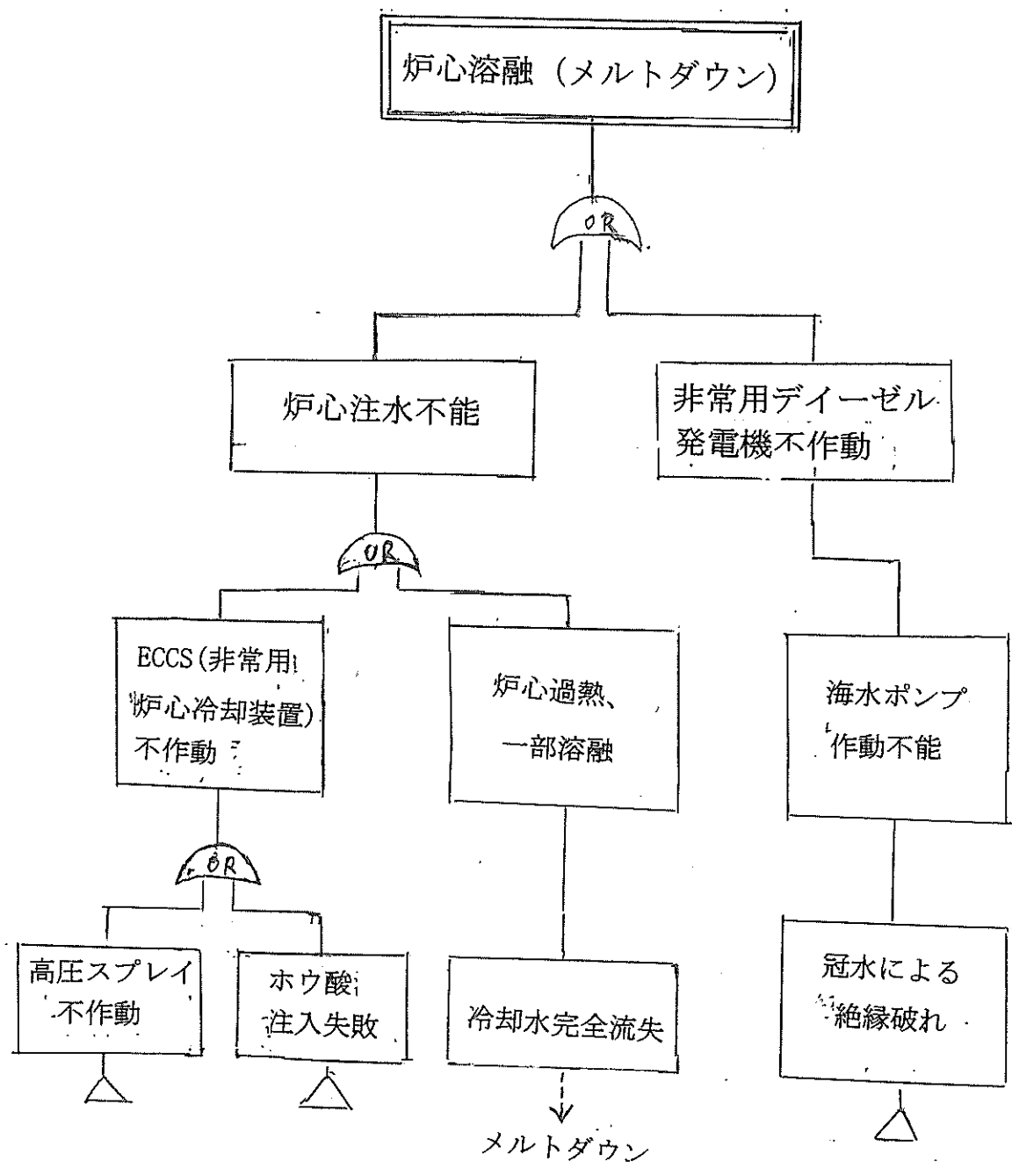
今回の福島原発における事故対応を見ていると、原子力技術の困難が見えてくる。本当は原子力以外の選択肢があればとも思う。しかし、現在の電力インフラとして、原子力に換わりうる技術は当面、見つかりそうに無い。いかにして放射能を封じ、安全性を高めるかが、原子力を選択した際の鍵である。そして、その実行には地味な技術の積み上げが必要であり、原子力といえども基本は通常の技術と何ら変わるところは無い。

文 献

- 1) 石谷清幹: 「水と炎の日々」 石谷清幹選集 (1981-4)
- 2) 石谷清幹: 「同上 (続)」 同上 (続) (1995-7)
- 3) 近藤次郎: 「巨大システムの安全性」 (昭61年11月) 講談社
- 4) 豊田正敏: 「原子力発電の歴史と展望」 (2010-3) 東京図書出版
- 5) 赤木新介: 「システム工学」 (1992-11) 共立出版
- 6) 武谷三男: 「原子力発電」 (1976-2) 岩波新書。



付図1、津波による原子炉 損傷の FTA の例 (一部)



付図2、炉心溶融 (メルトダウン) のFTAの例 (一部)