

福島第一原子力発電事故に思う

‘11-5-6 電気電子部門 藤田和夫

1. 日本の原子力発電(原発)の歴史

日本で最初の原子力発電が行われたのは1963年10月に東海村に建設された実験炉がある。日本に初めて設立された商用原子力発電所は同じく東海村に建設された東海発電所で運営主体は日本原子力発電である。

原子炉の種類は世界最初に実用化されたイギリス製の黒鉛減速炭酸ガス冷却型原子炉であった。しかし経済性等の問題があり以降に導入される商用発電炉はすべて軽水炉であった。

2. 原子力発電と火力発電の違い

原子力発電は、蒸気でタービンを回して発電する点では火力発電と同じである。

違いは火力発電のボイラーが化石燃料を使用するのにに対し原子力発電ではボイラーを原子炉に置きかえ、石油、石炭、ガス等の代わりにウランを燃料としていることによる。

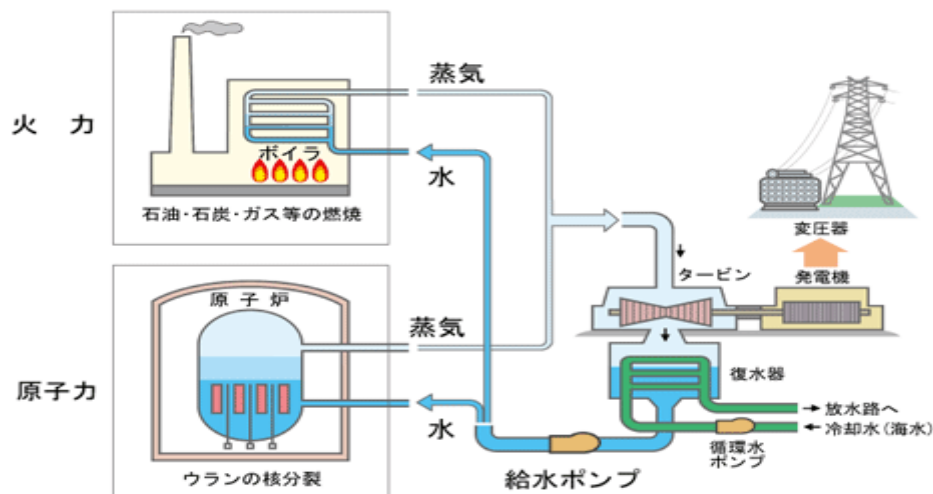
原子力発電と火力発電タービンのタービン設備の一般的な違いを下表に示す。

表 1 原子力発電と火力発電タービンのタービン設備の一般的な違い

項目	原子力発電	火力発電
1. 大きさ(タービン)	大(流量が大)	小(流量が小)
2. タービン温度・圧力	温度:280、圧力:70kg/cm ²	温度:560、圧力:246kg/cm ²
3. 回転数	低(1,500~1,800rpm)	大(3,000~3,600rpm)
4. 留意点	耐食性とする	高温材とする
5. 発電コスト(1,000MW)	6~9円/kWh	7~10円/kWh
6. 燃料費の割合	20%程度	60%程度
7. 建設費(1,000MW)	約300千円/kW	約190千円/kW

また原子力発電と火力発電システムの違い図を下図に示す。

図 1 原子力発電と火力発電システムの違い図(出典:電気事業連合会)



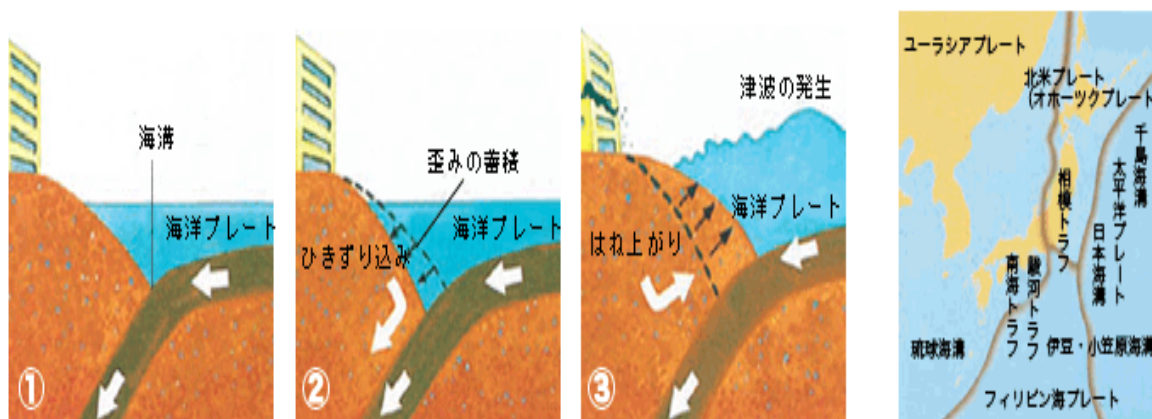
3. 原子力発電所事故の発生要因

福島原発の事故では、宮城沖約 130km を震源とする地震(M9)による津波が直接の原因となった可能性が高い。

地震発生直後は地震の揺れを検知して原子炉は運転を自動停止した。しかし約 1 時間後に堤防 5.7m に対し大津波（波高約 14m）が押し寄せ、すべての電源が喪失した。地震で冷却ポンプの動作を保つ外部電源が停止、冷却系への電力供給を担う非常用ディーゼル発電機は津波をかぶり故障した。非常用バッテリーもわずか 8 時間で切れたため、移動式発電機が搬入された。

地震、津波の発生要因は 海洋プレートの密度が高いため陸地プレートの下に沈む 陸プレートが引きずり込まれ歪が蓄積する 歪が限界に達し陸のプレートが跳ね上がり海溝型地震と津波を発生したと考えられている。（下図参照）

図-2 地震発生メカニズム（出典：文部科学省資料）



4. 日本の電力と原子力発電

4-1 日本の電力消費量（下図 日本の電力量参照）

日本の電力のほとんどは火力（石油:7.6%、LNG:29.4%、石炭:24.7%など）水力:8%、原子力:29.2%発電によってまかなわれている。

日本には1,300以上の発電所があり、快適な生活の高まり、情報化、高齢化などを背景に毎年約5%の割合で電力需要が伸びている。

4-2 原子力発電の概要（表-1 福島第一発電所原子力発電を参照）

- 1) 日本での現在稼働の原子力発電は 54 機あり総出力は 48,847MW で全体の発電電力量の約 30%を占めている(世界第3位)。また日本の原子炉形式は軽水炉が大部分である
- 2) 世界の原発は 435 機あり総出力は 392,128MW で全体の発電電力量の約 14%を占めている。
- 3) 燃料は二酸化ウランを使用している。但し福島第一発電所3号機は 30%程度のプルサーマル(MOX)を使用している。福島第一発電所の出力、燃料消費を下表に示す。

図 3 日本の電力量（出典：電気事業連合会）

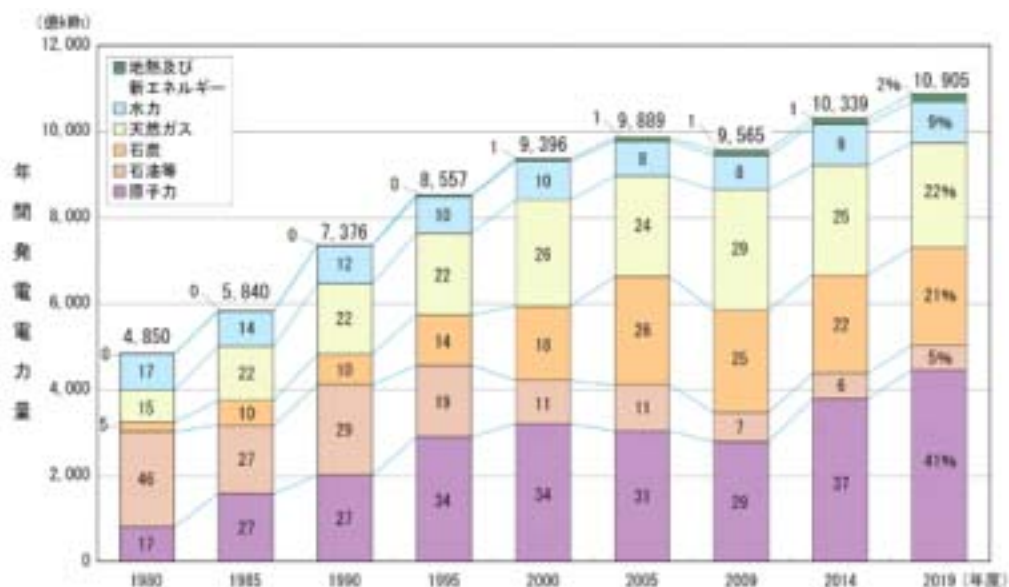


表 2 福島第一原子力発電（日本原子力産業協会の資料/2010年）

号機	出力 (MW)	燃料消費量 (Ton/年)	着工年 / 営業運転年	原子炉メーカー	プール内燃料棒(本)	破損状態
1	460	69	1967/1971	GE	292	×
2	784	94	1969/1974	GE/東芝	587	×
3	784	94	1970/1976	東芝	514	×
4	784	94	1972/1978	日立	1,331	×
5	784	94	1971/1978	東芝	548	○
6	1,100	132	1973/1979	GE/東芝	764	○

4. 福島第一原子力発電の配置と原子炉構造

4-1 配置

福島第一発電所原子力発電は下図に示す海岸の近くにあり、標高約 30m に設置されている。

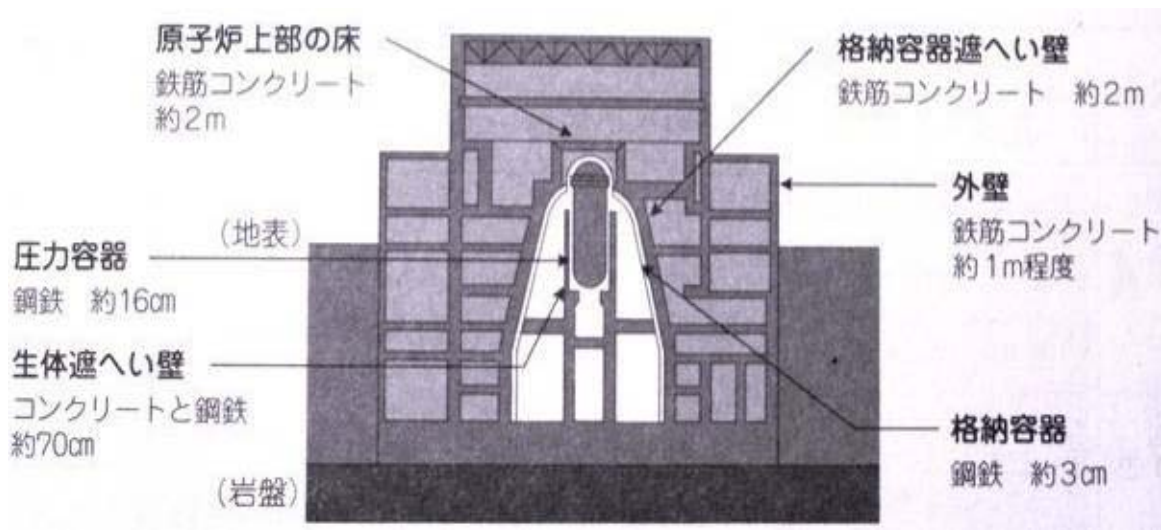
図 4 福島第一原子力発電の配置（出典：毎日新聞 4月1日）



4-2 原子炉構造

原子炉建屋は、「厚い壁を多く、規則正しく配置する」「基礎の面積を広く、厚くする」「屋根を軽く、重心を下げる」などの地震に強い構造とする。

図-5 原子炉構造図（出典：電気事業連合会）



5. 原子力発電所の仕様

- 1) 福島第一発電所原子力発電所の沸騰水軽水炉型原子炉仕様を下表に示す。
- 2) 原子力発電の寿命は運転、使用状態から約40年から60年とされている。
- 3) 1号機は500MWe級、2～5号機は800MWe級、6号機は1,100MWe級、7,8号機（計画）は1,356MWe級である。

表-3 原子力発電所の仕様（出典：火力原子力発電技術協会）

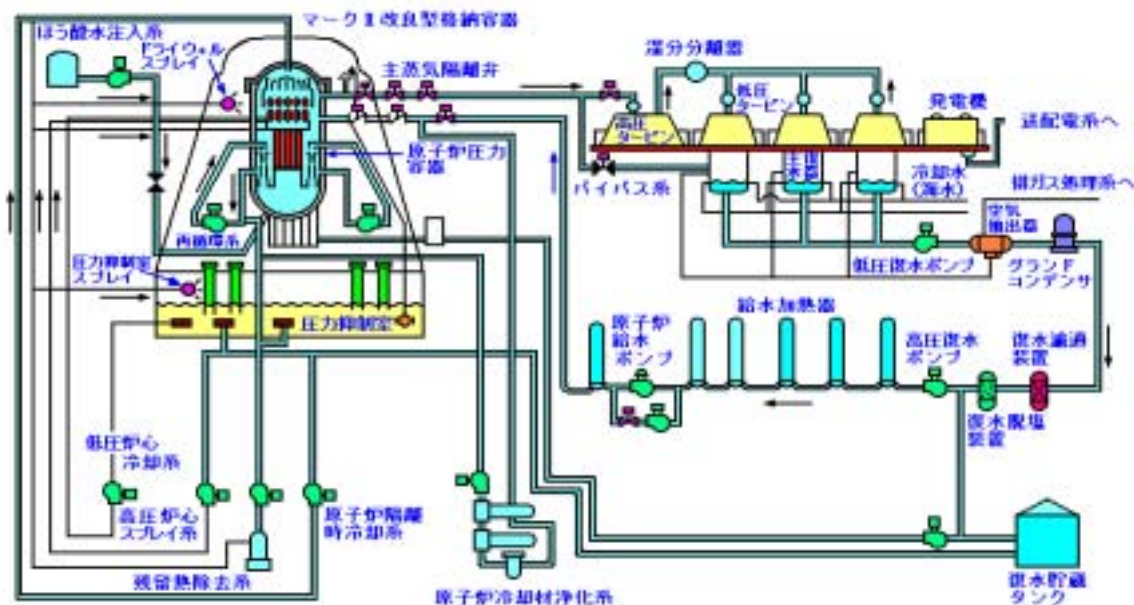
主要項目	500MWe級	800MWe級	1100MWe級	1356MWe級 (ABWR)
原子炉熱出力	1,356MW	2,381MW	3,293MW	3,926MW
原子炉圧力	70.3kg/cm ² g	70.7kg/cm ² g	70.7kg/cm ² g	72.1kg/cm ² g
蒸気流量	2,480t/h	4,440t/h	6,410t/h	7,640t/h
給水温度	178℃	197℃	216℃	216℃
燃料集合体数	400	548	764	872
燃料棒配列	8×8, 9×9	8×8, 9×9	8×8, 9×9	8×8, 9×9
制御棒本数	97	137	185	205
炉心寸法	3.4mφ×3.7m	4.0mφ×3.7m	4.8mφ×3.7m	5.2mφ×3.7m
炉心出力密度	40.6kW/l	50.4kW/l	50.0kW/l	50.6kW/l
炉心冷却材流量	21,800t/h	33,300t/h	48,300t/h	52,200t/h
原子炉容器	内径 4.7m 高さ 21m	5.6m 22m	6.4m 23m	7.1m 21m
原子炉再循環系	ポンプ 2台 外部再循環ポンプ 2台 ジェットポンプ 20台	ポンプ 2台 外部再循環ポンプ 2台 ジェットポンプ 20台	ポンプ 2台 外部再循環ポンプ 2台 ジェットポンプ 20台	インターナルポンプ 10台
適用タービン形式	50Hz用 TC4F-35 60Hz用 TC4F-38	TC6F-35 TC6F-38	TC6F-41 TC6F-43	TC6F-52

6. 原子力発電システム

6-1 発電システム

沸騰水型軽水炉発電の熱サイクルは原子炉で蒸気を直接タービンに送る。タービンで消費、分離された水は復水器を経て給水ポンプからの給水と混合して原子炉へ戻される。炉心周辺部の循環ポンプ及び原子炉内に内蔵されているジェットポンプで炉心へ戻る

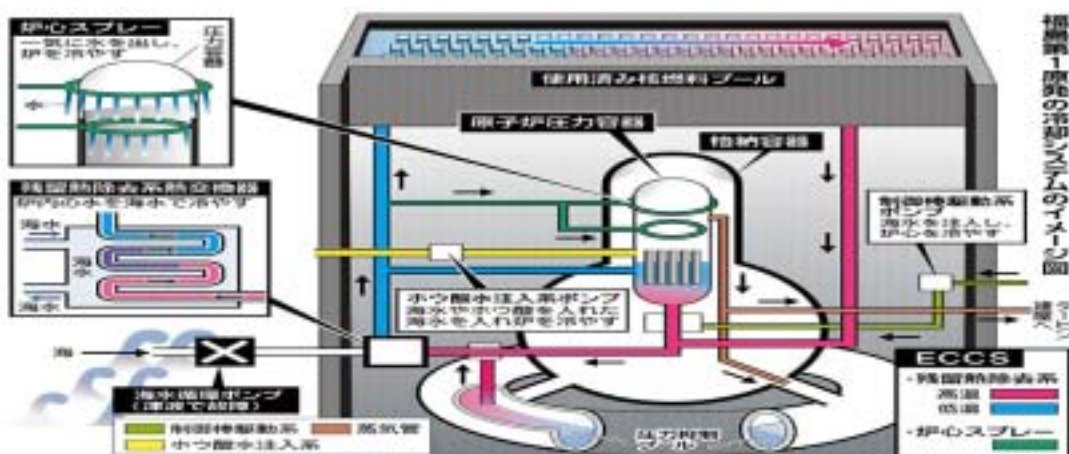
図-6 発電システム（出典：資源エネルギー庁原子力発電課）



6-2 冷却システム

非常用炉心冷却装置（ECCS, Emergency Core Cooling System）は、水を冷却材として用いる。炉心で冷却水の喪失が起こった場合に動作する工学的安全施設である。炉心に冷却水を注入することで核燃料を長期に渡って冷却し燃料棒の損壊を防止する。ECCS の作動は原子炉の停止を意味する。

図-7 冷却システム（出典：毎日新聞4月1日）

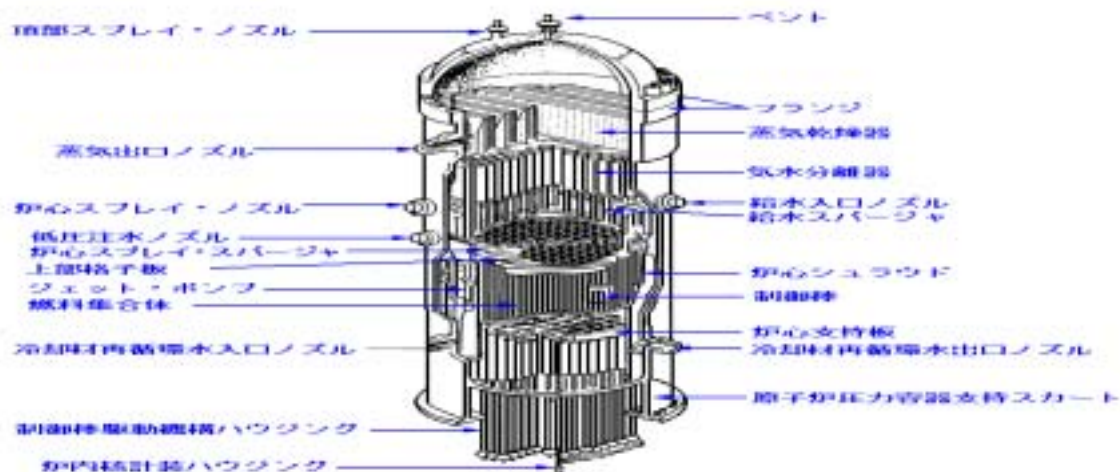


6-3 沸騰水軽水炉型原子炉容器内部構造

原子炉は臨界で水が高温になる。制御棒が水面から露出すると蒸発、1100℃に達して制御棒が水面から露出すると制御棒の表面ジルカロイは1500℃で融解、燃料は2500℃で融解されると言われる。

建屋で水蒸気が酸素5%、水素4%の爆発限界に達すると水素爆発を誘因する。

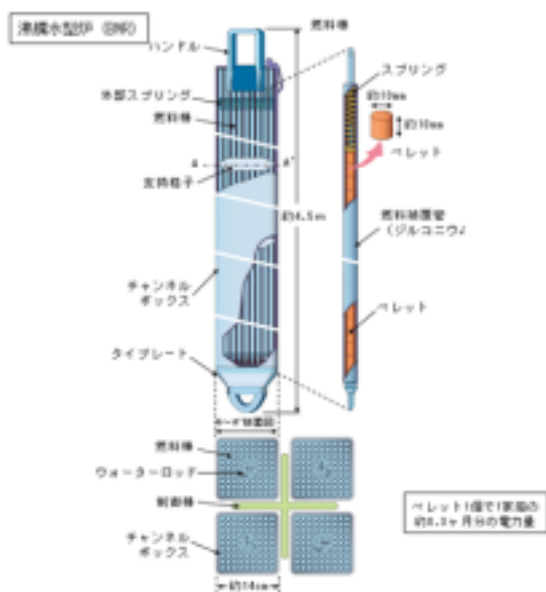
図 8 BWR 原子炉容器内部構造 (出典：原子力安全協会)



6-4 燃料集合体の構造と制御棒

核燃料は天然ウランに0.7%含む。このウラン235を2~3%に遠心分離機等で低濃縮する。燃料棒にはペレットを約300~500個/本とし、約50~60本を燃料集合体とし構成する。ウラン235の消耗は約3~4年間で新たな燃料棒に取換える。ウラン235は中性子を吸収しプルトニウム239になり高速増殖炉の燃料に利用する。

図-9 燃料集合体の構造と制御棒 (出典：電気事業連合会 HP)







7. 発電所事故・損傷状況

7-1. 主な原子力発電所事故

4月30日迄の主な原子力発電所の事故の履歴を以下に示す。

3/11	14:46 太平洋沖地震	3/15	4号機燃料プール水素爆発
3/12	1号機水素爆発で原子炉建屋破壊	3/19	6号機非常用発電機2台稼働
3/14	3号機水素爆発で原子炉建屋破壊	3/22	外部電源確保
	2号機圧力抑制プール一部破損		冷却水が海水に漏出る

報道（新聞、TV、インターネット）による写真集を下記に示す。

 <p>2号機建屋（水蒸気漏れ3月27日）</p>	 <p>3号機建屋上部（水素爆発後3月27日）</p>
 <p>4号機建屋側面（建屋上部損壊3月27日）</p>	 <p>4号機（使用済燃料プール内にガレキがある4月28日）</p>



7-2 破損状況

4月30日での各原子炉の破損状況は以下である。

図-10 破損状況(出典:毎日新聞4月1日)

の福島第1原発	1号機	2号機	3号機	4号機	5、6号機	水素爆発 破損 破損なし 燃料棒 破損の疑い
	地震発生時の状況	運転中	運転中	運転中	定期検査で停止中	
建屋						
格納容器						
タービン建屋の汚染水	20,000トン	20,000トン	20,000トン	20,000トン	—	
建屋外の汚染水	あり	あり	線量未測定	確認できず	—	
燃料棒破損	70%	30%	25%	なし(査中)	—	

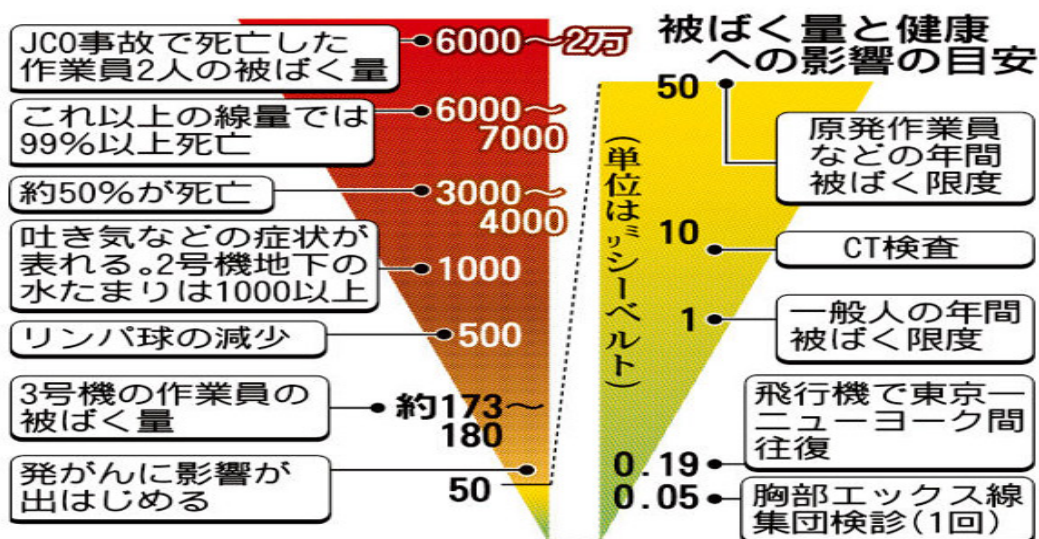
8. 被曝量と放射性物質

8-1 被曝量と人体影響

シーベルト(Sv)は人体に浴びた放射線量(放射性物質の強さと種類)を考慮して人体の影響度合いを考えて表す単位である。自然界では2.4mSv/年を浴びている。

健康被害の境界は 100mSv/年が目安とされている。被曝量と人体影響の放射線量を下図に示す。

図-11 被曝量と人体影響（出典：毎日新聞 4月1日）



8-2 食品の暫定規制値

ベクレル (Bq) は放射性物質 (ヨウ素、セシウム他) が放射線 (α、β、γ、x、中性子線) を出す度合の単位である。食品衛生法には放射線量の基準が無いため下記に示す食品の暫定規制値を国際放射線防護委員会 (ICRP) の勧告に基づいて定めている。

表-4 食品の暫定規制値 (出典：毎日新聞 4月1日)

食品の暫定規制値		
放射性物質の種類	厚生労働省が設けている規制値 (1kgあたりのベクレル値)	
放射性ヨウ素 (半減期 8日)	飲料水	300
	牛乳・乳製品	100 (乳児)
	野菜類 (根菜、イモ類を除く)	2000
放射性セシウム (半減期 30年)	飲料水	200
	牛乳・乳製品	
	野菜類	500
	穀類	
	肉、卵、魚、その他	

9. アクシデントマネージメント

原子炉は下図に示すアクシデントマネージメントが採用されていた。

- 1) 異常が発生し、非常用炉心冷却装置 (ECCS) もすべて故障した場合を想定する。
- 2) 本来消火用に使うポンプで炉心に注水し、燃料を冷却する対策を考慮する。

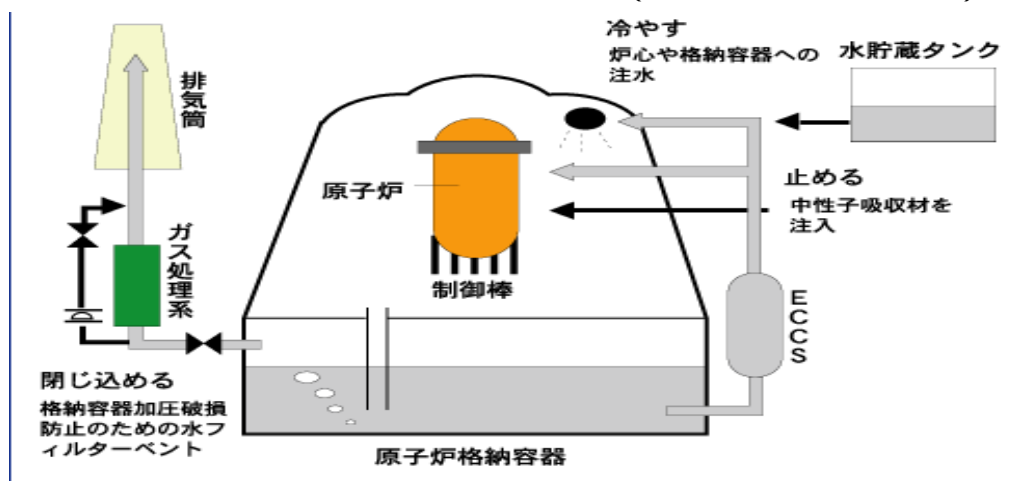
3) シビアアクシデントが発生したときは ECCS が作動する。

4) 緊急時に対応する詳細なマニュアルの整備、通報連絡体制、教育・研修を行う。

今回は地震の振動 (M9) には建物・構造物は耐え制御棒がスクランブルし「原子炉を止める」事に成功した。しかし津波に対しては冷却装置、電源設備が破損し ECCS も電源喪失で不能になり「原子炉を冷やす」「放射能を閉じ込める」機能が働かず重大事故のクラス 7 (IAEA 事故評価尺度) に至った。

図-12 アクシデントマネージメント

(出典：毎日新聞 4月1日)



10. 所感

今回の原発事故は 1979 年米国スリーマイル島及び 1986 年のソ連チェリノブイリ原発事故の経験が生かせなかった。

私は今回の事故は事業者、原子力安全委員会、政府がリスクを追求せず、原子力は安全であると言う神話を信じていたことにあると思う。

事故の拡大要因は本来事故を監視するモニタリングシステムや動力、照明、通信及び非常用電源装置が停電で全く作動せず機能しなかった事が上げられる。

特に非常用電源装置は重要で津波を避けるため高台設置または水密構造の格納庫に設置する必要があったと考える。

また外部電源は鉄塔の倒壊で使用できない状態となったが、原発の特異性からして鉄塔の耐震強度の強化や地中埋設等で他の電力会社からの二重、三重の Network 構成の電源供給とすべきと考える。

重要な電気設備は津波の影響を考慮し防水防塵構造とし多重の非常用電源装置で長期停電時間に耐えられるよう設計すべきである。

今回の自然災害は危機への想像力が乏しかった人災であると私は考えている。

技術者は科学的能力を涵養し専門家としての知識の結集と内容を正しく判断できる能力が求められる。

今後は災害復興に対して個人何が出来るかを考え積極的に支援活動に参加することにしている。