



【事故の原因】

原子力発電所の安全性は、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」の機能で保たれています。福島第一原子力発電所での事故は、想定外の地震と津波により全交流電源の喪失と最終ヒートシンク（最終的に熱を捨てる場所のこと。日本の原子力発電所では海水を使用）の喪失によって、炉心冷却機能、すなわち「冷やす」機能が正常に働かなかったことによるもので、その結果として「閉じ込める」の機能も損なわれてしまったことによるものです。今後、想定外という設定が適切であったのか検討されると思いますが、以下では今回の事故を引き起こした直接的な原因や事故推移についてのみ、現在入手できる限られた情報の範囲で説明いたします。

事故原因

想定外の大地震と津波による炉心冷却機能喪失

- 全交流電源の喪失
- 最終ヒートシンクの喪失

災害規模
マグニチュード:9.0
津波高さ:14~15m (想定値 5.4~5.7m)
地震加速度:おおむね耐震設計基準を下回る
550ガル(2号機) > 438ガル(設計最大加速度)



津波に襲われる発電所
(東京電力 ホームページ
TEPCO News Photo for Pressより)

班目春樹 原子力安全委員会委員長

「(原発設計の)想定が悪かった。想定について世界的に見直しがなされなければならない。」(22日参院予算委員会)

近藤駿介 原子力委員会委員長

「(政策推進の)判断基準に瑕疵があったと認めざるを得ない」

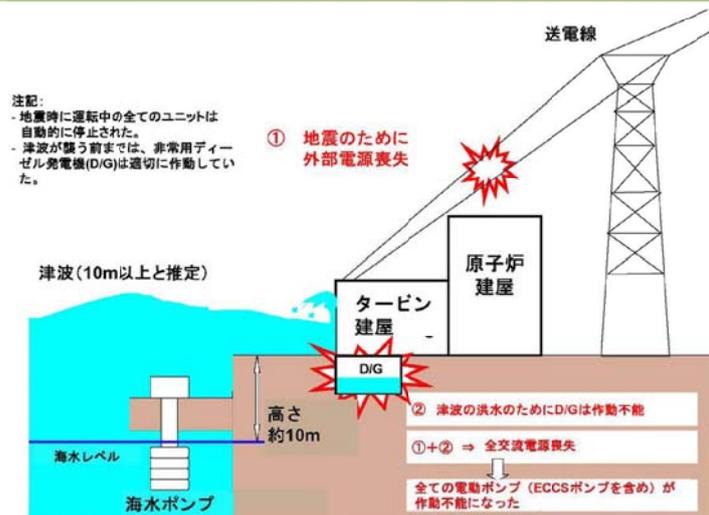




【全交流電源の喪失】

地震後、揺れを検知し制御棒を緊急挿入することで核分裂連鎖反応を止めることができ、「止める」については実行されました。地震の影響があった地域の稼働中の合計 11 機（東京電力福島第一発電所：3 機、東京電力福島第二発電所：4 機、東北電力女川発電所：3 機、日本原電東海第二発電所：1 機）の原子炉においても停止ができました。核分裂連鎖反応が停止しますと、当然発電機能も停止しますが、原子炉の崩壊熱（残留熱）を冷却するための電源が必要となります。原子力発電所ではこのような場合に備えて、送電網を經由して外部から電源を供給できるようになっています。しかし、地震によって送電網が壊れ、外部から電源を供給できなくなりました。このような事象を外部電源喪失と言います。原子力発電所ではこのような事態を想定し、複数台の非常用ディーゼル発電機を装備しています。これらのディーゼル発電機は外部電源の供給が途絶えたあと自動的に起動し、発電を始めました。しかし、地震発生の約 1 時間後に、あの大津波が発電所を襲うことになってしまいました。これにより、ディーゼル発電機の冠水や冷却のための海水取り入れポンプなどの流出により、発電機能が失われてしまいました。このことを全交流電源喪失と言います。

電源の喪失



「2011東北地方太平洋沖地震と原子力発電所に対する地震の被害」より(NISA,JENS)



HOKKAIDO UNIVERSITY



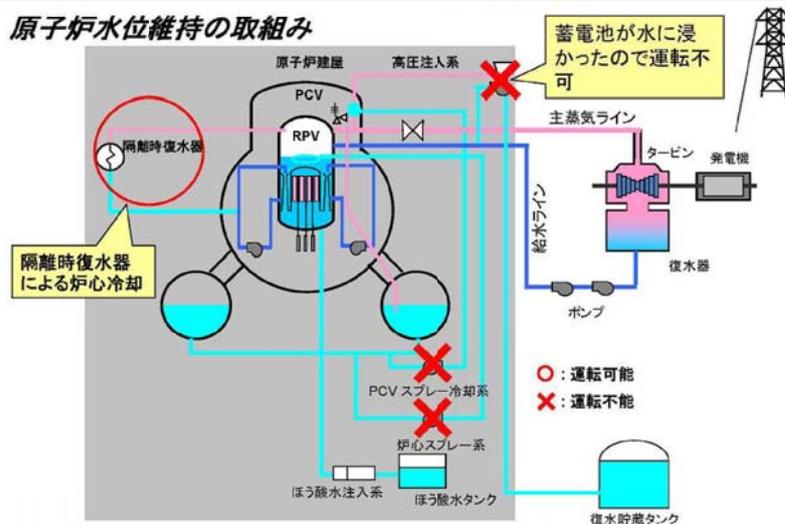


【冷却機能の喪失】

津波来襲後、炉心を冷却するための緊急炉心冷却系（ECCS）のポンプは、電源が無くなったことで作動することができなくなりました。しかし、原子力発電所には全交流電源が喪失した後にこれが復旧するまでのしばらくの間を電源がなくても炉心を冷却できる補助的な冷却装置が備わっていました。核分裂連鎖反応が停止した後も崩壊熱が発生しますが、この崩壊熱で発生した蒸気で駆動するポンプ（タービンポンプ）がありました。しかし、このポンプのバルブ制御にはバッテリー電源を使用していましたが、バッテリー容量は 8 時間程度と報告されています。1 号機では、このバッテリー電源が冠水したため使用できず、タービンポンプを利用した高圧注入系による給水ができなかったようです。1 号機には、その他に電源を必要としない非常用復水器という補助的冷却装置もありましたが、その冷却能力は限られたもので、地震発生 2 時間後には炉心冷却機能を失いました。2 号機と 3 号機は、バッテリー機能が働いたため 1 号機に比べて補助冷却装置の冷却機能は長持ちしましたが、それもやがてその能力を失っていきました。

事故の進展：津波襲来後直後

原子炉水位維持の取組み



「2011東北地方太平洋沖地震と原子力発電所に対する地震の被害」より(NISA,JENS)



HOKKAIDO UNIVERSITY



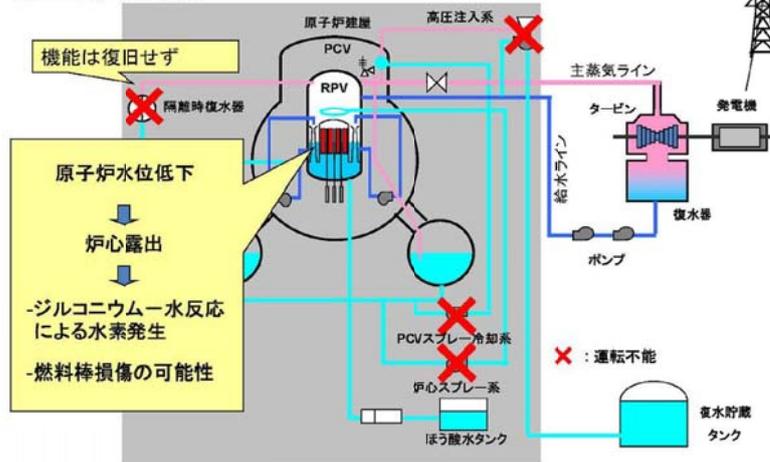


【炉心燃料の熔融】

津波の襲来直後やがて炉心冷却機能も喪失する事態となりました。冷却ができないため炉心で蒸気が発生し、炉心の圧力が上昇していきます。原子炉の圧力が過剰に高くならないように、この蒸気を原子炉格納容器に逃がす蒸気逃がし弁といわれる安全装置があります。これを開けることによって蒸気を格納容器内の圧力抑制プール内に噴出させ、蒸気を水に凝縮させます。しかし、このような操作を繰り返しておりましたが、給水が十分行われていないために炉内の水位は徐々に低下していき、ついには燃料棒の一部がむき出しとなり、その部分の温度が上昇します。燃料は燃料被覆管といわれるジルコニウムの合金の管に格納されていますが、燃料棒が高温になるとジルコニウムと水の化学反応によって水素が発生します。この反応は発熱反応のためますます燃料温度が上昇していきました。このことによって、被覆管の損傷や燃料の熔融が起きたものと考えられ、これにともない燃料内に存在していた放射性物質が原子炉内の蒸気に混入しました。さらに、この蒸気に含まれた水素と放射性物質は蒸気逃がし弁を通して、原子炉格納容器に流出しました。

事故の推移 炉心水位の低下

非常用復水器の冷却能力喪失のため原子炉水位が下がり、
続いて、炉心が露出



「2011東北地方太平洋沖地震と原子力発電所に対する地震の被害」より(NISA,JENS)



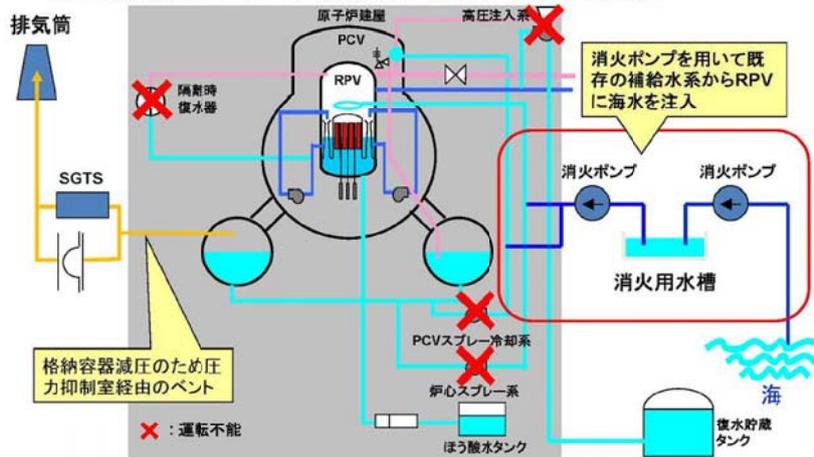


【放射性物質の放出】

原子炉格納容器内の圧力抑制プールに導かれた蒸気はプール内の冷却水温度を上昇させ、蒸気を凝縮させる能力が低下していきます。このことによって格納容器内の圧力が徐々に上昇していきます。格納容器は約 4 気圧程度の圧力にも堪えられるように設計されていますが、圧力がこの設計限界圧力に近づいたため、格納容器の破損を防ぐため蒸気を排気することにしました。この操作をベントと呼んでいます。このベント操作をしますと、そのさいには蒸気に含まれている放射性物質と水素ガスも同時に放出されることになります。本来であれば、蒸気は排気筒を通して原子炉建屋外の大気に放出されるはずでした。

事故の推移 海水注入による冷却

- 消火用水ポンプを用いて海水を注入
- 格納容器減圧のため圧力抑制室経由のベントを実施



「2011東北地方太平洋沖地震と原子力発電所に対する地震の被害」より(NISA,JENS)



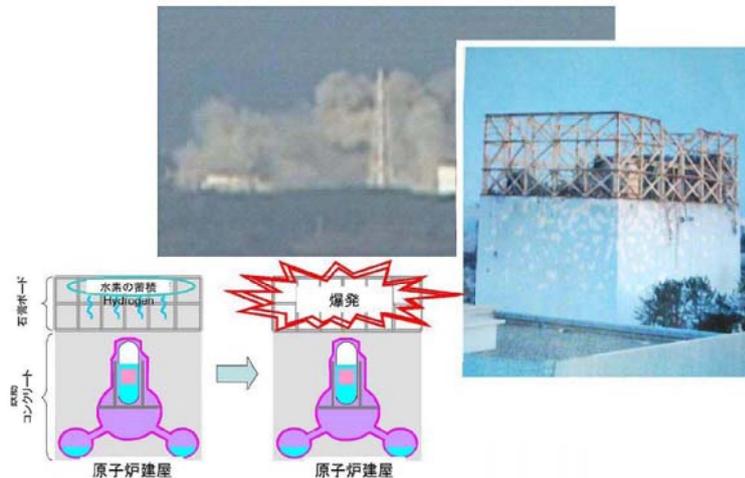


【水素爆発】

原因は明らかではありませんが、排気筒の配管の一部の破損などにより、水蒸気と水素ガスの一部が原子炉建屋内に放出されたのではないかと考えられます。このことにより原子炉建屋内上部に水素ガスがたまり、水蒸気が建屋壁で凝縮することで水素濃度が高まったことから、1号機と3号機では水素爆発が起き、原子炉建屋上部が破壊されてしまいました。この爆発の後、また火災発生がたびたび発生しましたが、そのたびに高い放射線量が観測されました。

事故の推移 水素爆発

オペレーションフロアで水素爆発



「2011東北地方太平洋沖地震と原子力発電所に対する地震の被害」より(NISA,JENS)



HOKKAIDO UNIVERSITY





【「閉じ込める」機能の喪失】

炉心水位の低下により燃料溶融によって燃料本体と燃料被覆管の障壁が損なわれてしまいました。また燃料溶融による压力容器底部の配管部の損傷や、蒸気逃がし弁からの放射能を含んだ蒸気の格納容器内への流出によって、压力容器の「閉じ込める」の障壁としての機能の一部が損なわれてしまいました。さらに、水素爆発によって1号、3号、4号の原子炉建屋上部が大破し、2号炉の原子炉格納容器も損傷したものと考えられています。

「閉じ込める」機能のほころび

1. 炉心冷却機能喪失
2. 炉心水位の低下
3. 燃料棒の一部または全体の露出
 - ・ 燃料被覆管と水蒸気による水素発生
 - ・ 被覆管の損傷と炉心燃料棒の一部熔融
 - ③ 燃料棒からの放射性物質の流出
4. 原子炉圧力の上昇
5. 蒸気逃がし弁から圧力抑制プールへの蒸気の放出
6. 圧力抑制プール温度の上昇
7. 原子炉格納容器圧力の上昇
- ⑧ 格納容器圧力低下のため排気(ベント)操作
1号機:(12日10:17)、2号機:(13日11:10、15日0:02)
3号機:(13日8:41、14日5:20)
9. 水素爆発
1号機:(12日15:36)、2号機(15日6:10)、3号機:(14日11:01)
- ⑩ 原子炉格納容器上部大破
- ⑪ タービン建屋地下への高放射線量の汚染水の漏洩

5重の障壁

- ・燃料本体
- ・燃料被覆管
- ・原子炉压力容器
- ・原子炉格納容器
- ・原子炉建屋





【使用済み燃料貯蔵プールの事故】

原子炉で使用した燃料は、使用済み燃料として大量に水を張ったプールに保管されます。このプールは使用済み燃料貯蔵プールと呼ばれ、原子炉建屋上部に配置されます。使用済み燃料はわずかですが崩壊熱があるため、冷却する必要があります。

使用済み燃料貯蔵プール

使用済み燃料貯蔵プール

- 原子炉で使用した燃料を、大量に水を張ったプールに保管
- 原子炉建屋の上部に配置
- 使用済み燃料はわずかであるが**崩壊熱**によって**発**を発生

↓

冷却が必要

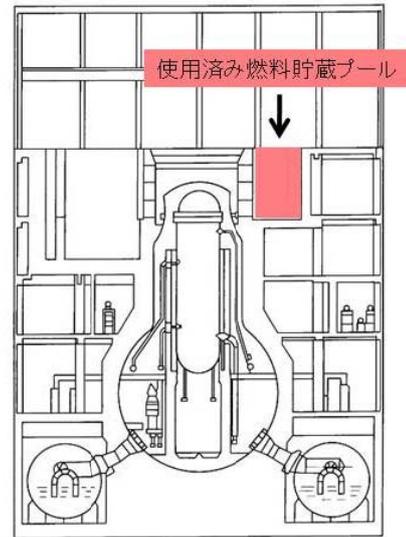


図1 Mark-I型格納容器

【出典】原子力安全研究協会(編):軽水炉発電所のあらし(改訂版)、
原子力安全研究協会(1992年10月)





【使用済み燃料貯蔵プールからの蒸気の噴出】

地震と津波によってプールを冷却するための電源が断たれたため、冷却されない状態が続きました。このため、やがてプールの水が蒸発を始め、水蒸気として放出される現象が観測されました。このままの状態が続くと、燃料の一部がむき出しとなり、燃料の溶融が起こり、水蒸気とともに放射性物質の流出の恐れがありました。特に、1号機、3号機、4号機では原子炉建屋上部が破壊されたため使用済み燃料貯蔵プールが大気に晒されている状態でした。このような危険な事態を避けるため、消防隊隊員や自衛隊隊員の献身的な活動による消防車両の放水が行われ、プールへ水を補給することで使用済み核燃料がむき出しになるような事態を避ける処置がとられました。現在は、コンプリートポンプ車などで継続的に水の注入や散水をしています。

使用済み燃料貯蔵プールからの水蒸気噴出

- 水素爆発・火災による原子炉建屋上部の大破
- 電源喪失による冷却機能の喪失



「閉じこめる」の3重の障壁の損壊の恐れ

- 原子炉建屋 → 上部大破により大気に晒されている状態
- 燃料本体 } プール水蒸発のためむき出しとなる恐れ
- 燃料被覆管 }

燃料溶融 → 放射性物質の流出



消防隊隊員・自衛隊隊員による懸命なプール水補給活動





【現在の原子炉の状態】

この表は現在の原子炉状態を示したものです。どの原子炉も燃料の一部が露出した状態で、炉心冷却のため水を継続的に注入しております。2号機においては原子炉格納容器の圧力抑制プール付近での水素爆発があったことから、格納容器の損傷が疑われています。また、原子炉圧力容器底部の貫通パイプ部のやや脆弱な部分が溶融燃料によって損傷したのではないかと予想されています。ベント操作による大気への放射性物質の放出やタービン建屋地下の高放射能濃度の汚染水の海水への漏出があり、それらの放出量の評価から、原子力安全委員会および原子力安全保安院では事故レベルをこれまでのレベル 5 から最悪の事故レベルのレベル 7へ引き上げました。

原子力発電所の現状

	1号機	2号機	3号機
圧力容器健全性	不明	損傷の疑い	不明
格納容器健全性	損傷なしと推定	損傷、漏洩の疑い	損傷なしと推定
原子炉建屋健全性	大破	一部破損	大破
炉心水位	燃料の一部露出	燃料の一部露出	燃料の一部露出
炉心燃料健全性	一部溶融(70%)	一部溶融(30%)	一部溶融(25%)
炉心への注水	真水注入継続中	真水注入継続中	真水注入継続中
タービン建屋	溜まりから高濃度放射性物質検出	溜まり水から高濃度放射性物質検出	溜まり水から高濃度放射性物質検出
使用済み燃料プール燃料健全性	不明	不明	破損の疑い
使用済み核燃料プールへの注水	真水散布	真水注入	真水散布と注入
事故レベル*	レベル 7**		

* 国際原子力・放射線事象評価尺度

** 原子力安全・保安院の評価





【事故レベル】

事故レベルというのは国際機関（IAEA、OECD）が定めた原子力事故の規模の大きさを表す尺度です。事故の規模は事故の影響度の度合いに応じて 7 つのレベルに分類され、レベルが大きい程大きな事故となります。これまでに起こった代表的な大きな原子力事故は、1979年のアメリカの Three Mile Island 2号炉[TMI-2]と旧ソ連のチェルノブイリ発電所の事故となりますが、TMI-2 はレベル5、チェルノブイリは最大の事故規模でレベル7に分類されています。事故レベルを、事故にともなう放射性物質の外部総放出量をヨウ素 131 で換算したもので分類すると以下のような表になります。今回の事故について、原子力安全保安院と原子力安全委員会で独自に評価したところ 37～63 万テラベクレルとなり、この分類では level 7に相当にすることになりました。テラとは10の12乗で、1兆となります。チェルノブイリの事故と比べると約 1/10 程度となっています。

国際原子力・放射線事象評価尺度 (ISEN)

レベル	レベル	影響の範囲		参考事例
		基準1 事業所外への影響	基準2 事業所内への影響	
7	深刻な事故	放射性物質の重大な外部放出	原子炉や放射性物質障壁が壊滅、再建不能	チェルノブイリ原子力発電所事故(1986)
6	大事故	放射性物質のかなりの外部放出	原子炉や放射性物質障壁に致命的な被害	ウラル核惨事(1957)
5	事業所外へリスクを伴う事故	放射性物質の限定的な外部放出	原子炉の炉心や放射性物質障壁の重大な損傷	スリーマイル島原子力発電所事故(1979)

ヨウ素131等価で放射性物質外部放出量と事故レベル (テラ: 10^{12})

	放射性物質外部放出量	事故	推定放出量
レベル 7	数万テラベクレル以上	チェルノブイリ	約520 万テラベクレル
		福島第一	37～63 万テラベクレル
レベル 6	数千～数万テラベクレル		
レベル 5	数百～数千テラベクレル	TMI	





【緊急対応】

原子力安全委員会は、今回の事故の重大さから、電力事業者ならびに日本原子力研究開発機構に、緊急安全対策の実施を4月中に実施するように指示を出しました。以下の表は応急の対応を示したものです。交流電源が復旧するまでの間、バッテリー電源の充電や、外部から冷却水を供給するポンプの電源を電源車などで確保します。また外部からの注水が十分に行えるように、消防車などで冷却水を補給するなどが盛り込まれています。

緊急安全対策の実施の指示

以下について4月中に実施を指示 原子力安全委員会(3月30日)

1. 緊急点検の実施
機器、設備の緊急点検実施
2. 緊急時対応計画の点検と訓練の実施
全交流電源喪失、海水冷却機能喪失などの緊急対応計画
3. 緊急時の電源の確保
必要な電力を機動的に供給する代替電源の確保
4. 緊急時の最終的な除熱機能の確保
機動的な除熱機能の復旧対策の準備
5. 緊急時の使用済み燃料貯蔵プールの冷却確保
機動的に冷却水を供給する対策の実施



2011年4月26日

北海道大学 大学院工学研究院 量子理工学部門

北海道大学 原子力系研究グループ

連絡先：web-admin@www2.qe.eng.hokudai.ac.jp

