

いわき市民訴訟 2023 年 3 月 10 日付高裁判決に対する意見書

2023 年 7 月 8 日

後藤 政志



はじめに

本件事故以前に。津波による建屋又は原子炉装置類の浸水を防ぐための技術として、防潮壁あるいは防潮堤（以下防潮壁とする）以外の技術も存在し、それらも津波対策として当然に想定範囲内であったことを主張する。

1. 筆者の略歴

1949 年生まれ。1973 年広島大学工学部船舶工学科卒業、同時に三井海洋開発（株）に入社、1989 年退社するまで、約 16 年間にわたって海底石油掘削装置リグなどの大型海洋構造物や海洋工事事業用特殊作業船の設計製作に従事。

1989 年退社後は、（株）東芝原子力プラント設計部門にて、2005 年頃まで原子炉格納容器の設計に従事。2009 年に東芝関係の会社から引退した。主として、当時日本ではじめて始まった過酷事故関係の研究で、原子炉格納容器の耐性評価（既存の原発の格納容器の圧力・温度や耐震上の強度限界を実験と解析で評価）に従事した。したがって、原子力プラントの過酷事故対策の重要性や安全性、構造物の耐水密設計に関しては、技術者として長い経験を有している。

2005 年東京工業大学より、学位論文「大規模構造物の設計とリスクを考慮した評価手法に関する研究」で博士（工学）の学位を授与。

海洋構造物の安全性に関して、金属学会論文「海洋構造物の事故と安全性」¹⁾がある。なお、原子力関係の過酷事故に関する研究論文が、共著を含めて約 40 本以上ある²⁾。

2. 津波対策としての防潮壁の設計と設置

津波対策は、地震対策と異なり、津波高さが決まると、その津波高さを超えるか超えないかで、その対策の有効性が決まる。例えば、防潮壁の設置であれば、津波高さが設置された防潮壁を超えなければ、よほど強度的に脆弱な構造になっていない限り、津波が敷地に浸水してくることはない。そうした観点からみると、襲来する可能性のある津波高さの想定が重要になる。例えば、様々な知見を基に最大 15m の津波が来ることが想定された場合に、防潮壁の高さはどのように決めるべきか考えてみる。

(1) 津波高さは一定程度の余裕をみて防潮壁高さを設定することが肝要

津波は自然現象であることから、どんなに精度の高い推定をしたところで、津

波高さは想定値 15m を超えることは、十分あり得る。技術的工学的な面からは、少なくとも 20%程度の“余裕”^{a)}をみて、 $15 \times 1.2 = 18.0\text{m}$ 程度に設定して防潮壁を築くことを推奨したい。この 20%という“余裕”がどこまで妥当かは、それを判断する技術者によるため、相当幅のある値であると考えられる。しかしながら、自然環境条件を相手に長年大型構造物を設計した経験のある技術者から見ると、設計上与えられた 15m という値をそのまま適用して津波に対する機能喪失限界を 15m にする発想はあり得ない。特に、原子力発電所においては、津波が襲ってきた場合の、原子炉の停止や冷却機能の喪失は十分に想定されるため、津波の波高の推定には、十分な安全余裕をとることが求められる。

注 ^{a)} : 20%という値に確たる根拠があるわけではないが、通常の構造物の強度に関する安全率を考えると、(あくまでオーダーであるが) 長期荷重(通常時の荷重)であれば、1.5 から 2 倍程度の安全率をとることが想定され、短期荷重(異常時)であれば、めったに発生しない荷重であるため、安全率は 1.1 から 1.25 程度と推定される。もちろんこれらの値も、構造物の種類や重要性、材料の種類にもよるが、重要なことは、自然現象の最大荷重として与えられた荷重は、想定を超えることがあり得るということが重要な認識である。また、原子力発電所において、津波が想定を超えることは、極めて危険なことであることも重要な視点である。もともと、構造物の強度基準には 10%から 50%程度大きくとることが望ましいと考えたため、あえてあまり過大にならない値で、ある程度の余裕を見込んだ数値の例として、20%つまり、1.2 倍を仮定したものである。なお、荷重を 1.2 倍してものを作る場合には、短期荷重の強度の安全率 1.1~1.25 程度が設定されていると考え、実際の強度余裕は、 $1.1 \times 1.2 = 1.32$ 倍~ $1.25 \times 1.2 = 1.5$ 倍となる。

したがって、この 20%という値は自然現象の振れ幅を十分カバーできるものではないが、それでも短期荷重の実際の強度で考えれば、1.32 倍から 1.5 倍程度の余裕を確保したことになる。ただし、防潮壁の強度の安全率を 1.0 としている場合には、20%の荷重余裕は不十分であるかも知れない。

(2) 波力を計算する場合の基本的な考え方

津波波力の評価をする前に、波浪による波の波力を考えてみることにする。

筆者の経験では、海洋では「実際の設計条件は海域によるが、カナダ沖等の暴風雨状態における最大設計波高は 30~35 m にもおよぶ。また、海域により流れの影響も考慮する必要がある。与えられた波浪、流れに対して構造物に働く流体力を計算する方法は、ポテンシャル理論を用いる方法とモリソン式という抗力と質量力の和として求める方法がある。(以下略)」¹⁾ p.1217 など流体力すなわ

ち動水圧などについて詳細な説明を記している。

なお、抗力とは水粒子の流速による力で、質量力は水粒子の加速度に比例する力を意味する。波力の計算にあたっては、波の回転運動（波は水面上で水粒子が最大の回転半径の回転運動をしており、水深が深くなるにしたがって回転半径が小さくなる）による水粒子の速度と、流れによる流れ方向の水粒子の速度を加えた後に、抗力を計算することが肝要である。なぜなら、抗力は水粒子の速度の2乗に比例するから、波の回転運動による抗力と流れによる抗力を別々に計算して、足すことは誤りであり抗力を過小評価することになる。ただし、津波の場合には、波の周期が非常に長く、結果として、水粒子の流れが深さ方向にもほぼ同じ状態になるため、水粒子の流速をそのまま用いて波力を計算してかまわない。ただし、砕波を伴う衝撃的な波力は、別途衝撃による考慮する必要がある。

このように、波や流れの対する工学的な基礎知識も重要であり、安全上当然慎重な姿勢にならざるを得ないことが分かる。

（3）防潮壁の強度設計上考慮すべき事項

与えられた想定津波 15mがどれだけの根拠を基に提案されていたとしても、想定を超える津波がありうることは自明であるため、公式には津波高さ 15mで設計したとしても、実質的な構造強度設計では、設計上の不確かさ等を考慮して 15mにある程度の余裕を見込むことは、設計者の常識である。

ただし、防潮壁の場合、津波が防潮壁を乗り越えると、敷地内に乗り越えた津波が建屋の壁に当たる。さらに津波は一定時間、例えば数分から数十分近く洋上から陸地に向かって流れるが、その後の数分から数十分の間は、陸地から海に向かって戻る流れが発生するため、防潮壁は陸側からの流れにも耐えるように設計する必要がある。

また、当然ながら防潮壁自体が強度的に破壊しないことが求められる。したがって、想定津波高さより多少高い津波に対しても強度的に崩壊しない設計にすべきであろう。“崩壊しない設計”という意味は、部材が局所的に損傷することはあっても、壁全体が壊れることがないようにいわゆる“粘り強い設計”にすることを意味する。

（4）津波の動水圧に関する考え方

福島事故以降、従来の津波の動水圧の評価では、不十分であり、津波による防潮壁にかかる力を見直すべきとの指摘もあった。しかし、津波対策の設計指針において提案されずで実行されていると推測されるが、具体的には、津波高さから水深に掛ける係数を3から何割か大きくする見直しがされているが、この修正は段波^{b)}等の特殊な条件下で、起こりうることで、津波の波力を想定する時

に、従来より大きな荷重になり得ることを示している。最大津波力が大きくなる現象が発生した場合に、従来の基準を超える可能性があるとして、提案されたもので、必ずしも福島事故における津波でこうした現象が起きたということではない。設計基準として考慮すべきことにすべきであるが、防潮壁という自然環境を相手に作るものにおいては、一定程度のばらつきは、本来安全率の範囲で吸収されるべきものである。このことは、津波による防潮壁の波力による強度評価上、その重要度に応じて安全率を、一般の港湾等の場合と、原子力発電所の場合とでは、後者の場合にはより大きな余裕を持つべきだと解釈することもできる。

注^{b)}：段波とは、津波の先端の形が、大きく垂直の面になっているような衝撃を伴う波のこと。

(5) “洗堀”による防潮壁基礎の補強をすることが望ましい

津波が壁を乗り越えて大量の海水が壁の向こう側に落下し、そこの地盤を掘り起こすこと（“洗堀”といわれる現象で、橋梁などの土木関係の構造物ではよく知られている）があり得るため、防潮壁の前後の基礎も広い範囲にわたって補強したり、石などを敷き詰めるなどの対策をしておくことが望ましい。なお、洗堀は福島事故以前にも、河川の橋脚などで起こることは良く知られていた現象であり、土木系の技術者であればある程度は、洗堀に対する対応も考慮できたと考えられる。ただし、2011年3月の津波では、場所により大きな洗堀が見られたので、津波による洗堀現象が考慮すべき検討対象とされるようになってきた。また、津波は一定時間海側から陸側に流れた後、陸側から海側に向かって流れが反対方向になるため、津波が壁を乗り越えれば、海側に洗堀が起こることも想定される。ただし、洗堀は必ず発生するとは限らず、地形や津波の状況によっては、主たる問題にならないこともあり得る。したがって洗堀に対する対策は、あくまで場所や構造にもよるため、十分考慮しておくべきことのひとつとされる問題である。

(6) 防潮壁は非常に長く大きな鉄筋コンクリートあるいは鋼製構造物であり、（自然現象として大きな津波がくる可能性はあるものの、頻度がそれ程大きくない場合は）経済性の観点からは、あまり高い防潮壁にしたくない。そうした面から、防潮壁は十分余裕のある設計がしにくい面がある。

防潮壁の設置は津波対策として広く認められているが、想定津波の不確かさや、防潮壁の大きさ、特に長さが何kmにもわたる構造物のため、必ずくるかどうか分からない大きな津波に対して、（経済性の観点から）十分余裕のある設計

をしにくい面があることも確かである。そのため、一般的には、防潮壁の強度評価上適用される安全率は、通常の構造物より余裕が少ない傾向にあると考えられる。しかしながら、防潮壁で守るべき対象が、原子力発電所であることを考えると、一般の防潮壁と同様の強度基準（安全率の設定値が小さすぎる）を提供することは、原子力発電プラントの設計からは、リスクが高すぎると言わざるを得ない。

したがって、経済性も視野に入れると、防潮壁だけに津波対策を期待することは無理があり、原子力における多重防護や多層防護の観点からは、他の技術的な方法を検討することは、ごく自然なことと考える。

なお、多重防護や多層防護の考え方は、原子力の分野では、福島事故以前から考えられてきた考え方であり、決して後知恵の思想ではない。「船舶の設計では、前述したように外板が破れて浸水した時に、1 つないし 2 つの区画が浸水したと仮定して損傷後の復元力特性を確保する設計をしている。こうした設計思想は他の分野、特に原子力プラントで行われている多重防護の考え方と近い。」¹⁾

page1225

実際に原子力ではない海洋分野でも、「6.5 セミサブ型リグの構造設計」では、「全体構造解析に先立って、船舶と同様な防撓板構造として、甲板荷重や各種の機器や搭載物の自重、タンクのオーバーフローを考慮したタンク内水圧や外板の波浪変動水圧、外板損傷浸水時の水圧、係留力、船舶の接舷時の荷重等に対して規格計算や局部強度解析が行われ板厚、防撓材が仮決定される。セミサブの全体強度を検討するには、静的な重力・浮力の他に、複雑な流体力や船体動揺による動的な荷重を考慮する必要があり、有限要素法(FEM)を用いて立体骨組み構造解析を行う（以下略）」^{1) p.1219}としている。

3. 建屋の水密化と建屋内の防水対策

津波が防潮壁を超えて建屋周囲の水位があがることを考えると、建屋の水密化という考え方が出てくる。原子力では防潮壁が津波対策の基本であるとの考え方も言われているが、建物の防水化はどのようにしたら可能かを考えてみる。

(1) 陸上の建物は水密になっていないが、原子力発電所の建屋は一定の水圧には耐えられる強度があるあるいは補強もできる

通常陸上の建物は、嵐等の豪雨と風速 50m/秒（最近では 60m/秒以上）を超えるような暴風下においても、強度的に損傷することなく、風雨が建物内に入らないように、作られている。空気の取り入れ口や排気用の開口部等は、必要なら塞ぐなどして、建物に風雨が入らないようにすることは容易である。しかし

ながら建物の周囲が何 m も水位が上がると、ずっと水圧がかかり続けるため、広い空間はもとより、小さなすきまであっても、その隙間の数が多くなれば、当然かなりの水が入ってくる。つまり、鉄筋コンクリートでできており、暴風雨に対する対策はできていても、長時間水没（静水圧がかかる）していると、水が入ってくるので、水圧に対する“防水化”はなされていない。

ただし、建屋のある敷地に津波による海水が流入し、例えば 5~6m 程度の水位上昇があったとしても、開口部をふさぎ大型の扉等を一定の水圧（水深 5~6m）に耐えられるように追加工事をすることは容易である。開口部のない建屋外部の鉄筋コンクリート製の外壁は、耐震性や放射線防護上等の理由で、厚さ 1m 以上ある場合が多く、水圧に対する強度評価をすれば、大半の場合、十分水圧に耐えられる。また、建屋の防止化を行う場合には、一定の水深を考慮して、水圧で壁が崩壊しいことを計算で確認できる。もし、壁自体の強度が不足していることが確認されれば、コンクリートの内壁に補強用の梁を追加すればよい。

なお、水圧に対するコンクリート壁や鋼板製の壁の強度評価や補強のしかたは、船舶工学、土木工学、機械工学系の材料力学や構造力学で、古くは船舶や土木構造物で 100 年オーダーの歴史があり、当該分野の技術者からみれば、ごく当たり前の技術にすぎない。

それを、原子力では津波に対して構造物として耐えられるかどうか分からないとか、津波の動水圧の評価ができなかった等という主張は、他産業の歴史とそもそも水圧に対する構造設計という工学知識を理解していない極めて非常識な認識だと考える。

津波に関する、構造物の設計の問題は、まず①津波高さが何 m かという予測の問題であり、②想定津波高さを十分余裕を持って設定すること、③動水圧のかかり方における不確定な部分は、想定津波高さに余裕を持たせると、構造強の安全率（実際の材料強度より十分余裕を持たせた強度評価をする）の評価により達成できるし、こうした工学知識は、タイタニック号の時代から多少の紆余曲折はありながらも、十分な実績をもっている。実績が欠けているのは、あくまで“津波高さの予測”である。

なお、筆者の論文でも「通常の船体構造では、板に縦横に防撓材を配置した防撓板構造を縦横に組み合した箱型構造をしているため、一部材の破壊がすぐ全体の崩壊に繋がることは、脆性破壊のような不安定破壊でない限りまず生じないと考えて良い。これは、ブレースのような軸力部材からなるトラス構造と箱型の防撓板構造との違いで、前者ではトラス部材の破壊がその部材の耐荷力を喪失させ、その荷重を他の部材が支えきれずに次の破壊が生じ、直ちに構造全体の不安定な破壊に繋がる可能性があるのに対して、後者は荷重伝達経路が複数存在し、ある部材の損傷後、荷重の再配分が生じ他の部材が肩代わりしてくれる

可能性が高い。つまり、構造強度上の冗長度が両者では明確に異なる。」¹⁾page1222
~1223 としており、防潮壁や建屋壁の強度に関する考え方も示されている。

(2) 津波による静水圧と流れによる動水圧

津波のように一旦津波が防潮壁を超えて、一定時間（例えば数分から数十分程度まで水位が上昇し、その後同様な時間かけて水位が下がってくる。それを複数回繰り返して水位上昇と降下が発生する。）周囲の水位が維持され、建物の地階あるいは1階さらに2階あたりまで水面がくることが想定される状態が生じる。

津波は、流れを伴うため、プール内の静止した水のように静水圧がかかるだけでなく、流れの方向には動水圧もかかる。水圧の求め方は、まず水面までの水深に比例する静水圧を計算し、それに流れ方向の動水圧を計算して求めることができる。少し詳しく説明すると、流れによる水粒子の衝突による動水圧は、流速の2乗に水の密度と係数0.5を掛けることで、結果として静水圧の何倍かという係数をかけて評価することができる。例えば、川の流れのように、流速がわかればその流れによる動的な荷重を計算し、静水圧に加えることで、容易に計算できる。なお、水圧（ここでは、静水圧+動水圧の合計）は、単位面積（例えば1cm当たり）の値として、水深毎に求められる。それらを水圧のかかる壁全体について積算することで、当該壁面にかかる力が求められる。こうした水圧の計算方法は、物理学や水力学あるいは流体力学など工学の教科書で確認することができる。

(3) 原子力発電所の建屋を水密化することは工学的には容易

現実にある原子力発電所の建物を津波に対して水密化と言った時、考慮すべきことが、下記のように何点かある。

①原子炉建屋やタービン建屋およびその他の建物（いずれも鉄筋コンクリートできている）は、比較的窓などの開口部はないが、空調設備の空気の取り入れ口や排気するために開口部が存在する（下線筆者、以下同様）。これらの開口部は数十cmから物によっては1mを超えるものまで、高さは比較的高い位置にあるものが多い。しかしながら、津波高さがこの開口部位置より高くなると大量の水が入ってくることになる。

②特に、タービン建屋には、点検工事や改良工事の時に、大型の機器類を搬入、搬出するための、大物搬入口と言われる縦横数mから10数mくらいある大きな扉が設置されている。この大型の扉は津波の水位が高くなると、大きな力がかかるので、変形して扉の周囲に隙間ができ水がその隙間から大量に流入することが想定される。この場合、水深が同じであれば水圧、つまり単位面積当たりの水の力は同じであっても、扉の大きさが大きくなるほど、扉全体にかかる力は

きくなる（扉全体にかかる力は“水圧”×“扉の面積”で計算される）ため、大きな扉ほど変形しやすくなるため、扉を丈夫にする必要がある。

③もう一つは、建物の壁に設けられた、小型の扉や配管、ケーブル等の貫通部の隙間からの漏えいである。これらの隙間は、それほど面積は大きくないため、水圧による補強工事は簡単にできる。特に貫通部では、水圧（水深）は多少高くても、樹脂などにより詰め物をするようなやり方で止水は極めて容易である。ただし、点検により見落としがないようにすることは重要である。

（４）鉄筋コンクリートの建屋の水密化は容易な技術で実績もある

陸上の建物は、大小様々な開口部をすべて水密にしないと、水密化できない。しかし、前述のようにタービン建屋の大物搬入口の扉を水圧に耐えられるように作りかえることができれば、後の小さい開口部の水密化は容易にできる。

そもそも水密化ということは、水深に応じた静水圧と流れ等の水粒子の速度を考慮した動水圧に対して構造物の強度が保て、ドアなどの水圧に対する変形量が、当該部分のゴム製のガスケットの限界変位量以下になるように計算で求め、必要により補強するなどして耐水圧構造をつくることができる。船舶にしる、土木構造物にしる、当該産業分野では日常的に使われている技術で、“動的な流体力が計算できないから、津波に対して構造物が設計できない”などということは、ありえない。工学が理学と違うところは、科学的に詳細な解析を求めることより、近似計算でも実用的に十分な精度で設計し、物を作ることができることで発達してきた。分子レベルの粒子の動きを計算することは、現在のコンピュータ解析なら相当詳しく解析できるが、構造物を設計するには、ごく特殊な場合を除いて、いちいちそのような解析をしなくても、工学的には十分に設計ができる。

なぜなら、その産業分野の経験上、解析結果にどの程度のばらつきが発生するかが推定できており、そのばらつきをカバーできる程度の安全率を見込んで設計することで、安全性を確保できる蓋然性が高くなるからである。

（５）津波の動水圧は津波が直接壁に衝突する時に発生するが、流れが堰き止められた後は、静水圧だけがかかる。

水粒子の速度がそれほど大きくない場合には、動水圧は小さく、静水圧が大半をしめるため、静水圧を基礎にした計算で概略構造設計を行い詳細な検討の段階で動的な水圧を計算し、静水圧を補正・修正する形で全体の水圧を求めて設計を進めることが多い。これは、動的な影響を無視していることではなく、水粒子の速度が時間と共に変化する場合には、その水の動きを逐一計算していくことが繁雑であり、特に流れの方向だけでなく、それと垂直方向の動水圧（流速が早

くなってくると流れの周囲の水が流れこんでくるため、全水圧は静水圧より小さくなる)も時間毎に計算して構造物を設計することは、物を設計する上で効率が悪いので、物理的な根拠を基にしつつ、工学的に簡素化した方法が用いられている。工学的な評価はそのようにしてなされてきており、「船舶の防水化設計は静水圧を基礎としており、津波による水粒子の速度を考慮していないから、津波には適用できない」などという主張は、動水圧や静水圧に対する船舶や土木工学の常識と、産業技術の歴史的発展を理解しない空論である。防水化における基本的な問題は、動水圧が加わるのは、水粒子の流れによる衝突が継続している場合であり、津波が壁に直接ぶつかる場所だけで、水が建物の周囲から回り込んでくるような場合には建物の外壁にはほとんど静水圧しかかからない。また、建物の中に浸水したような場合は、中に流入した水が堰き止められて水が静止した状態では静水圧がかかるだけで、特に流れによる浮遊物の衝突などの荷重も、衝突した瞬間にかかるだけで、その衝撃で損傷しなければ、その後の静水圧には十分耐えられる。実際に福島では、特に防潮壁や建物の水密化をしていなかったが、開口部や補強されていなかった外壁の扉の損傷も、すべての箇所で浸水したわけではない。

(6) 水密扉の設計

大物搬入口は縦横約数mから十数m程度の大きさがあり、防水構造の実現が難しいといった見解も見られたが、古くから存在する船舶、海洋構造物の水密扉の設計からみれば、動水圧もふくめて扉への水圧を考え、周辺をピン支持された四角い平板として材料力学で、強度と変形量を計算し、扉と壁の接触部に取り付けられた、ゴム製のパッキンの変位限界以下になるように扉の剛性を確保すれば、十分水密化できる。なお、細長い扉の場合は、幅と高さのうち短い方の辺による剛性で扉中央の変形量が決まり、四角い扉の4つの角は、水圧はかかる方向と反対方向に浮き上がるように変形する。したがって、4隅の角の扉の浮き上がり量を一定程度(ゴムパッキンの厚さから決められる変位限界)に抑えるように設計すれば全く問題ない。また、船の上甲板上の扉のことで、船舶の規定等を持ち出して、水圧がかかる水密構造ではない、等と水密扉の設計製作ができないような趣旨のことを言っているところもあるが、船体の動揺と波浪の衝撃的な流れ込みを考慮した船や海洋構造物では、船体甲板が相当水没した状態でも、船舶の沈没を防ぐための水密隔壁につながる上部の扉は、水密扉としての性能をも止まられる。船舶の既定でも細部まで細かく規定されており、そうした個別産業の基本的な認識なしに、条文だけで防水構造の細かい既定を議論するのは、間違っている上、防水構造の何たるかもきちんと理解することなく、防水化の形式的な話で安全性に関わる議論をすることは、その業界における常識を分からずに

議論するという意味で有害ですらある。

船体内部の水密隔壁（船が浸水した時に、沈没を防ぐために設置された隔壁）に取り付けられた水密扉はこうした技術は、数十年から100年オーダーの歴史がある。

（7）仙台高裁判決でも津波に対する対策をやっておけば事故を回避できた可能性が高いことを示している。

いわき市民訴訟 仙台高裁判決令和5年3月10日によると、多数意見として、「本件事故を回避することができる相当程度高い可能性があったこと」（page21）と結論づけている。さらに「・・・経済産業大臣が技術基準適合命令を平成14年末に発していれば、長期評価により想定される最大でO.P.+15m程度の津波高さとなる想定津波を前提とし、「安全上の余裕」を確保した上で、防潮壁の設置、あるいは「重要機器室の水密化」及び「タービン建屋等の水密化」などの防護措置を講じ、本件津波に対しても、非常用電源設備等が浸水して原子炉が冷却できなくなって炉心溶融に至るほどの重大事故が発生することは避けられた可能性は、相当程度高いものであったと認められる。」（page21）としている。

津波特有の現象はもちろん重要だが、理屈で一部のことが考慮されていない等と、他の産業分野では津波のことを理解していない等と主張せればするほど、原子力分野の技術者や研究者が、いかに世間の産業技術を理解していないかが分かってくる。

（8）波浪と津波の違い

例えば、典型的な動水圧の基本は海洋の波浪だが、波浪は水粒子が一定方向に回転運動をしており、波高に応じた水の回転運動が海面で最も大きく、水深が深くなるにしたがって回転運動の半径が小さくなる。津波では、この波の周期が、数分から数十分と非常に長くなっただけで、津波の流速は波浪と違って一様に流れることと、時間が経過すると、反対方向に流れることが違うだけである。

この水粒子の動きから、逐一動的な流体力を計算して動的な水圧を求める代わりに、水深と波高と波長から、静水圧として波力を求め、対象となる構造物の形状を考慮して強度計算を行い構造物を設計している。津波でも同様に、簡易式で動圧を計算して防潮壁等の設計をできる。ここでも、水粒子の挙動がわからないから、津波による波力が計算できないなどと言って、津波による評価をできないなどと言う主張が通るのであれば、津波による力を受ける防潮壁などは、福島事故以前は存在しなかったことになる。それは明らかに間違いで、津波の最大波高の推定ができなかったことが問題であり、津波の専門家であった元東北大学

の今村教授が指摘している、従来の津波波力の係数が不十分な場合があるので修正すべきだと主張は、その通りであると考えているが、福島事故以前に使用してきた波力式の係数を一部修正するだけであり、基本的な津波波力の求め方が変わるわけではない。設計時に想定する安全率の範囲内に収まるかどうかは、検討が必要だが、従来の津波波力の式で十分適用可能な範囲があると考えて良い。一部段波等の評価では修正が必要な場合もある、といった問題であり十分安全性を考慮したものづくりをすれば、建屋の壁の防水化などは、かなりの確率で問題なく設置可能である。

そのように津波対策の状況には、それ相応の幅があることを認識しつつも、従来の想定より相当大きな 15m もの津波がくる可能性が分かっているが、「津波高さの想定信頼性」に疑問をはさみ、「当時の原子力関係者の間では、防潮壁以外の津波対策など主張した専門家はいないとか、そうした考えには至らなかった。」等と自然現象のもつ不確かさを前面に出して、あたかも「津波対策をやっても事故を防げなかった」等と、原子力という最も高度な安全性を扱っている事業者とは思われない発言をしてきた。地震や津波等の自然現象が不確定性の高い現象であることは自明のことであり、安全性の観点から、地震や津波の最大値を特定できないこと、そしてその値は相当な幅があることも認識した上で、原発の炉心溶融事故を防ぐ方法を検討すべきである。仮に、それが不可能であるとするなら、常に原発の重大事故の発生を覚悟の上で原発を運転するか、危険であるから運転しないかしかない。

なお、船舶より歴史の新しい石油掘削リグなどの海洋構造物でも、構造形式によっては、精緻な形で動的な流体力をコンピュータ解析で求めることも 1970 年台広範囲には行われていた。しかし、それでも水圧に対する部分的な構造設計などは、船舶でルール化されている簡易的な手法を駆使して行われている。

例えば、船舶の場合には、船の長さに等しい波長の波を静止した状態で考え、近似的に波高に比例した静水圧がかかるものとして計算する。この時、水は厳密には様々な動きをするが、いちいち波浪による動的な水の動きなど考慮しない。なぜなら、波浪による動的な荷重は、波周期に応じた繰り返し荷重として、波の進行方向に対して前後の繰り返しの荷重として働くが、船体構造の水密壁に対しては波高から求めた静水圧を基礎にしても十分な精度で設計ができるからである。船舶の歴史は事故やトラブルも含めてデータを蓄積し、その上でこうした工学的な判断を基礎にした設計指針（基準）の形で進化してきたもので、それが現在の各船級協会のルールとなっている。

なお、高速増殖炉「もんじゅ」の配管内の流れに設置された温度計さや管が、流れと平行な方向の振動により疲労破壊を起こし、ナトリウム漏れによる火災を伴う大事故が発生した。この時、このさや管を設計していたメーカーの技術陣は、流れと垂直方向に振動するカルマン渦の存在は知っていたが、振動数が2倍の双子渦による振動は知らなかったため、疲労強度の厳密な設計をしなかったとされていた。そして、この後様々な試験を繰り返し、流れ方向の振動の考慮した設計指針をつくり提供した。それ自体は普通なことのように思えるが、原子力ではなく、海洋構造物を設計してきた筆者から見ると、流れの中で細い片持ち梁（固定部分から細く突き出した揺れやすい梁構造）の構造物が流れに誘起されて振動することは、ある種の常識であり、細かい計算など関係なく、経験上そのような温度計さや管の設計は避けることが流体に係る構造物をつくる技術から見ると常識的な問題に属する。「もんじゅ」は、流れの中に細い針状の構造を突き出し、しかも付根の段差の部分の応力集中を避けるための角部のRすら取らないという機械工学における常識も持ち合わせていなかった極めて初等的な設計ミスであった。

なお、波浪は波の進行方向に対して、数秒から数十秒の繰り返し荷重がかかるが、津波はその周期が非常に長く、数分から数十分、時には30分近く同じ方向へ流れがつづき、その後、同様の時間は反対方向への流れが生じる。そうしたメカニズムが分かっているため、津波の波高が推定できれば、それから流速もある程度決まるので、動水圧も求めることができる。すでに述べたが、従来の津波による波力式の修正が必要な場合は、段波と呼ばれる波の壁が生じ砕波を伴う場合などに発生するが、いつも発生するわけではない。したがって、津波波高がある程度推定できれば、防潮壁や建物の壁の水密化はかなり高い蓋然性をもっと、実現できると考える。

（9）津波のシミュレーションと防潮壁の高さ

津波について、水の動き特に水面の高さに関して数値シミュレーションを実施した場合に、津波の波源の位置や海底地形および建物の配置等を考えると、ある方向から来た津波に対する場所ごとの津波高さ差があったとしても、方角が異なる津波や、異なる波源による津波等様々な条件を考えると、自然現象を対象とした構造物の設計としては、場所ごとに高さを変えるだけの技術的根拠は薄い。また、場所ごとに高さを変えることによるコスト低下はそれほど望めないから意味はなく、むしろ安全性の観点から、このような構造物の技術者なら、一律の最大津波高をもって、同じ高さの防潮壁をつくる蓋然性の方がはるかに高い。

なお、構造物の設計をする場合、決して一つや二つの選択肢ではなく、工学的

に可能な様々な構造様式を選択できる。工学的には外力さえ求められれば、周辺の状態に応じて様々な設計が可能であり、むしろ、場所がせまいとか、障害物があるなどということ、代替案が不可能であることを証明できる蓋然性は極めて低い。

4. 多重防護と多層防護の防水化に対する適用の必然性

原子力における主要機器等の防水化の技術について、すでに、防潮壁も十分慎重につくれば、重大事故を防ぐことができた可能性はあるものの、他方で、想定津波高さの設定が、必ずしも津波の上限を示すものでない以上、想定外の津波が来た場合には、重大事故を確実に防げるとは保証しかねることも事実である。特に原子力発電所の津波対策となれば、相当高度な安全性を求められるため、防潮壁の設置だけでは、明らかに大事故発生リスクが予想される。

元々、原子力プラントの安全性の基本には、多重防護や多層防護といった、大事故の発生確率を抑える考え方があった。福島事故ではその多重防護や多層防護を有効にできなかった事実はあるが、事故以前でも津波対策で不十分なことが判明した時点で、その対策の有効性も確認しないまま、漫然と運転を続けることなど、ありえないことである。原子力発電の非常に大きな危険性と、防水化に関する多少の知識がある技術陣がいれば、多重防護、多層防護の観点から直ちに、①防潮壁の早期設置、②防潮壁の高さが不十分であれば、そのかさ上げ、③それでも想定以上の津波が来た場合に備えて、建屋外壁の水密化、④建屋外壁が漏えいした場合に備えて、建物内の壁、重要機器類の入った扉を水密化する等の方法が即座に思いつくはずである。こうした考え方はすでに触れたように、船舶でも良く使われる防護策のひとつであり、日ごろ原子力の安全対策を考えている技術者であれば、決して飛躍のある考えではない。

ここで、さらに安全性の観点から、①、②、③、④と多重防護したとして、それでも、建屋外壁や内部の水密化において、見落としや失敗などがあった場合を考えると、⑤津波の来ない高い位置（例えば 35m 盤）に非常用電源等を移設する考え方出てくる。

少なくとも、少々の見落としや失敗があっても、重大事故にいたる経路は遮断すべきであると考え、この⑤の案にすれば、少なくとも津波による重要機能の機能喪失は避けられる可能性が十分に高い。

したがって、多重防護、多層防護の観点から、上記①から⑤をできるだけ早期に実施することが、重大事故を防ぐための最も現実的な方法であると考え。

もちろん、高所に機器類を持って行けば、地震による損傷のリスクやその他のマイナーであるが、懸念される技術課題は発生しうるが、もともと、耐震技術は十分に把握しており、最も懸念される津波対策を放置することと、地震等他の事

故にいたるリスクとを比較すると、圧倒的に津波対策の重要性が浮き上がってくる。仮に、もし津波対策をそこまでしても、原発の重大事故を防げないと判断されるなら、確実な対策ができるまで、運転を見合わせるべきであろう。

5. 福島事故に関して国の責任がどう関係しているか考察する

- (1) 経済産業大臣が被告東電に対し、長期評価によって想定される津波への対策として防護設置の設置を命ずる技術基準適合性命令を発していれば、炉心溶融などの重大事故等は防げた可能性が高い。

前述の仙台高裁判決で、多数派の意見として、p21 から国の責任に関する判断が書かれている。平成 18 年以降に行った溢水勉強会における、東電の柏崎刈羽原発の建屋内水密化工事のことや、日本原電の東海原発の建屋の水密化工事や、中部電力・浜岡原発でも、平成 20 年までに津波対策なされていたことなど、東電がそれまで幾度と津波対策を実施しうる状況であることを取り上げている。その上で、平成 20 年 7 月、長期評価による津波への対策を先送りすることを、決定した。「・・・平成 14 年 7 月の長期評価の公表後、同年末以降適時に、経済産業大臣が被告東電に対し、長期評価によって想定される津波への対策として防護設置の設置を命ずる技術基準適合性命令を発していれば、平成 23 年 3 月 11 日までの間には、少なくとも東電設計が試算した最大 O.P.+15.7m の津波に対する対策として、敷地への防潮壁の設置、あるいは「重要機器室の水密化」及び「タービン建屋等の水密化」の措置を講じることには、十分な時間的余裕と技術的な可能性があったと認められる。」(page22) と対策の有効性を認めている。

そして、「技術基準適合命令」を発していれば、被告東電は当然にこれらの措置を講じたと考えられ、また、津波に対する原子力発電所の安全対策は、炉心溶融による重大事故を万一の場合でも防ぐため、・・・同エリアの南西部の浸水高が、局所的に約 16m から約 17m であったという本件津波が到来しても、上記の防潮壁の設置や水密化の措置により、非常用電源設備が浸水して機能喪失し、全電源を喪失して炉心溶融を起こすような重大事故の発生は、相当程度高い可能性を持って避けられたはずであると認められる。」(page23) とも評価している。

さらに、「地震及び津波が諸条件によって複雑に変化し、予測が困難な自然現象であって、これらに関する研究や予測の技術も発展過程であることを考え併せれば、原子力発電所の安全対策にあたっては、長期評価に基づく津波の想定において、東電設計の試算のみでなく、これを基本としつつも、相応の幅を持って津波を想定し、機器を評価するのが、当然であると考えられる。」(page23) とし、「長期評価の公表から 8 年以上もあったのであるから、こうした設備工事が

平成23年3月11日までの間に完了できたことは容易に推認できる。」(page24)と防水対策の有効性を認めている。

以上のとおりであるから、長期評価を前提に、経済産業大臣が技術基準適合命令を発した場合、被告東電としては、速やかに、敷地の東からも津波が遡上しないよう、防潮壁の設置や重要機器室やタービン建屋等の水密化等の適切な防護措置を講じた可能性は相当程度高いものということができる。」(page24)とほぼ全面的に、東電の責任を認めている。

(2) 技術基準適合命令を発しなかった不作為が重大な義務違反であること

「・・・経済産業大臣が規制権限を行使しなかった不作為は、・・・炉心溶融に至る原子力発電所の重大事故を防ぎ、地域住民の生命身体に対する重大な危険が生じないようにするための重要な権限であり、原子力基本法の基本方針である原子力利用の安全の確保のため、電気事業法に基づき；運転中の原子力発電所の施設を規制することにより公共の安全を確保する権限がもっぱら経済産業大臣に委ねられていたことからすれば、極めて重大な義務違反であることは明らかである。」(page25)としている。

そして、保安院については、「本件津波が発生するまで経済産業大臣は、長期評価の想定に基づく津波の試算を被告東電に命ずることもなく、想定される津波への福島第一原発の安全対策を被告東電に命ずることもなかった。」(page25)と、その不作為の無責任さを非難している。

「長期評価によって想定された福島県沖での津波地震により、福島第一原発が津波により浸水して重大な事故を起こす危険が具体的に予見されたにもかかわらず、これに対する被告東電の対応は、原子力発電所の安全対策についての著しい責任感の欠如を示すものである。」(page26)と改めて東電の無責任さを責めている。

(3) 本件における国家賠償法1条1項の適用について (page26)

「原子炉を冷却するための設備に係る重要な区画及びその建屋について水密化等の措置が適切に講じられていれば、これらの設備が浸水によりその機能を失うことを防止する上で重要な効果をもたらしたものと考えられる。」(page26)と指摘した上、他方で、被告東電が講じたであろうと考えられる津波対策に関して、「・・・津波の想定の方や防潮堤、防潮壁、水密化等の防護措置の方法の選択において幅のある可能性が考えられるものであって、このような幅のある中で、必ず本件津波に対しても重要施設の浸水を防ぐことができる防護措置が

講じられたはずであるとまでは断定できない。」(page26~27)と、それまでの東電の責任や不作為をすべて、否定して「防護対策の幅があるので、有効な防護対策が講じられたはずとまでは断定できない。」等とほとんど明確な根拠にもならない理由で、これまで指摘してきた東電の責任をすべて帳消しにしている。

判決の内容から、その趣旨を推測すると、

- ①本件地震は、長期評価において想定される地震の規模よりはるかに大きいものであり、津波の規模においても、東北地方から関東地方北部の太平洋側を中心に極めて広い範囲で観測された。つまり、自然現象であるから、想定を超えることがあり、どんなに津波対策をしても、それを超えてしまうことがあるとの主張。
- ②東電の事故後の評価では、「最大津波に対して敷地内への浸水を防ぐため防潮壁による対策を実施した場合でも、O.P.+10mの敷地地盤に浸水することを防ぐことはできないことを確認している。」等としてこの部分だけ、東電の言い分を認めている。
- ③ただし、津波による主要建屋付近の浸水深さは、1.5mないし5.5mであり、東電設計が試算した津波の浸水深さと大差はない、とも指摘している。

- (4) 技術基準適合命令を発しなかった不作為が重大な義務違反である、にも関わらず、国に責任はないとすることはおかしい。

津波対策としては、「多重防御の考えに立って対策を講じ、本件事故をも回避できるに足る対策がとられた可能性は相当高い。」(page28)とまで言いながら、「防護措置の方法の選択が広いことを理由として、重要設備の浸水を防ぐことができる防護措置が講じられたはずであるとまでは断定できない。」との2つの判断は、互いに矛盾している。

「しかし、津波の想定や想定される津波に対する防護措置について幅のある可能性があり、とられる防護措置の内容によっては、必ず本件津波に対して施設の浸水を防ぐことができ、全電源を失って炉心溶融を起こす重大事故を防ぐことができたはずであると断定することまではできないのである。」(page28)と、防護措置の方法に幅があるから、炉心溶融を起こす重大事故を防げたはずと断定することまでできない、等と言ったら、例えどのように防護対策をしても、必ず事故を防げるとは言えないことになり、あらゆる炉心溶融事故の責任は問われないことになる。これでは、技術基準適合命令を発しようとしまいと、不作為があろうとなかろうと、事故の責任はないことになる。すでに述べたが、技術的工学的な対策を一つや二つではなく、多種多様に存在するので、技術的な視点さえきちんと持っていれば、一定の蓋然性を見込む対策が見つかる可能性が高

い。原発の過酷事故対策について、このような無責任が通るならば、大規模な原発事故は避けられないことになる。

また、「そうすると、平成23年3月11日の東北地方太平洋沖地震による津波によって浸水した福島第原発が、炉心溶融を起こして爆発し、大量の放射性物質が拡散した事故により、原告らが被った損害について、国家賠償法1条1項の適用上、経済産業大臣が、技術基準適合命令を発する規制権限の行使を怠ったことによって、違法に原告らに損害を加えたとまでは評価することができない。」

(page28)として、国の規制権限に効果がないかのような判断をしており、以下の「経済産業大臣の技術基準適合命令も、稼働中の原子炉施設について、周辺住民等の生命、身体に対する危害を防止すること等を目的として、その安全性を確保するために付与された重要な規制権限である。」(page28、下9行)ことと矛盾してくる。

このような事情に鑑みれば、経済産業大臣が、長期評価により福島県沖を震源とする津波地震が想定され、津波による浸水対策を全く講じていなかった福島第一原発において重大な事故が発生する危険を具体的に予見することができたにもかかわらず、長期評価によって想定される津波による浸水に対する防護措置を講ずることを命ずる技術基準適合命令を発しなかったことは、電気事業法に基づき規制権限を行使すべき義務を違法に怠った重大な義務違反であり、その不作為の責任は重大であるといえる。

「しかし、国家賠償法1条1項の適用にあたり、経済産業大臣が、電気事業法に基づく規制権限の行使を怠った義務違反の不作為によって、違法に損害を加えたと評価することまではできないと考える。」(page29 上段)として、原発事故対策の不作為が、違法に損害を加えたことを否定する判断をしている。あたかも、国は原子力に関して、自らは責任がなく、事業者がしっかりと対策をすれば、それでいいといった態度である。これでは、福島事故のレベルの過酷事故を防ぐことなど、到底できない。日本は、原子力を推進する機関や組織が「原子カムラ」を形成し²⁾、安全神話を喧伝してきたが、それを規制機関および国がそれをサポートし、時には法的あるいは組織の在り方等について、安全対策を広い形で支えることが求められていたはずである。

そもそも、「経済産業大臣が、重大事故を回避するために与えられた「規制権限の行使を怠る」こと以上に、「国民に違法に損害を加える行為」など、存在しないのではないか。原子力発電の特徴から、重要なことは、福島事故のような大規模な炉心溶融事故とそれに伴う、放射性物質の大量放出は、事故の進展によっ

ては、数千万人の避難を発生する可能性、つまり国の存続を脅かすレベルの危険性が具体的にあったことである。原発事故の責任は一義的に事業者にあるとしながらも、事業者が重大事故に対して十分な対策を講じているか、十分な安全対策ができる環境になっているかどうか、規制基準の適合性が妥当かどうかは、原子力規制委員会が審査の責任を負っているが、同時にそれら全体の国レベルの安全性に対する姿勢が問われていると考えられる。これこそが、国の責任であろう。これを国の責任ではないというのであれば、国が原子力の推進や安全性の確保に関する発言は全く信用できなくなる。

(5) シビアアクシデントマネジメントに対する国の責任に関する記述

ところで、アクシデントマネジメントが適切に行われるためには、原子炉設置者が、最新のシビアアクシデント研究の成果などを参考にして、その実施に関してあらかじめ有効適切と考えられる措置の手順を定め、それに必要な資機材並びに実施体制を整備し、要員を訓練しておくことが大切である。それらのことを考え合わせると、このアクシデントマネジメントに関して国のとるべき対応については、次のようないくつかの考え方がある。

一つの考え方は、前述のようにアクシデントマネジメントについて効果的な実施が奨励又は期待されるという立場から、原子炉設置者がアクシデントマネジメントに係わる整備等を行うよう指導し、例えば保安規定の認可に際してその内容を確認すべきとするものである。

また別の考え方は、不適切なアクシデントマネジメントが原子炉設置者によって計画され、設計基準事象に対する防護の水準が低下することを防止する観点から、原子炉設置者により計画されるアクシデントマネジメントが工学的安全施設の適切な利用を阻害するものでないことを、例えば、工事計画の認可の際に確認すべきとするものである。具体的には、格納容器にフィルター付ベント設備及び水素燃焼装置などを付加する場合、設計基準事象に対する工学的安全施設の機能に悪影響を及ぼす可能性について、安全規制の一環としてチェックされるべきであるとする考え方である。

さらに次のような考え方もある。アクシデントマネジメントは本来原子炉設置者がその技術的知見に基づき、現実の事態に直面しての臨機の処置も含め、柔軟に行う措置であるから、国の事前評価により結果として特定の手段を排除することなどは、効果的なアクシデントマネジメントの実施を阻害することになりかねないと考えられる。しかし一方、緊急時対策の効果的実施の観点からは、関係者間で十分な調整が必要と考えられる。また PSA の結果などを分析するとアクシデントマネジメントの持つシビアアクシデント時の安全確保機能は、審査指針に基づく安全評価においては期待されていない機器あるいは機能を用

いる場合でも、本来異常状態に対処するために設計された機器・系統等に匹敵する効果が得られる場合もある。これらのことから、国は、原子炉設置者がアクシデントマネジメントに係わる整備を行う際に参考とするための基本的考え方を整備しておくべきであるとする考え方である。

6. 小括

国の主張によれば、事業者および規制当局ならびに国の責任をそれぞれ考えた場合に、自然現象による事故では、だれも責任を負う必要がないことになる。これが、通常の被害の限定された事故であれば場合によってはよいが、原発の炉心溶融事故という、きわめてシビアな大規模事故の責任を、「天災」として不可抗力の事故にしてしまうことになる。それでは、とても責任を持った原子力に対する姿勢とは言えない。

通常の事故では、天災による事故はやむを得ないものとすることもあり得るが、こと原発事故に関しては、直接操作等に関与した運転員がたとえミスをして、その責任をすべて取らされることは間違いだが、天災のせいにするならば、原発など稼働できるはずがない。原発の炉心溶融事故は、自然現象だけでなく、機器類つまりハードの故障やソフトウェア、さらに人為的なミス、テロ攻撃や国際的な軍事的脅威など、すべてにわたって十分な対策をとるべきであることは論を待たない。

原発を安全に運転するためには、少なくとも通常時から、事業者が積極的に重要な事故防護対策を実施すべきで、規制委は事業者の活動内容を常時確認する必要がある。その上で、政府は規制が正しく行われているか、相当長いスパンで監視を続ける義務があり、それを規制機関が的確に審査しているか、確認しあるいは事業者が常に的確な防護対策を実施する環境になっているか慎重に監視する義務がある。原子力発電所の事故に関しては、事業者の積極的な活動だけでなく、規制委とそれが有効に機能していることを確認する広い意味での監督機関として、責任を負うべきである。特に、最近の原発回帰や運転期間延長に関する法整備の在り方を見ると、炉心溶融事故などの、最終責任は国が持つべきであろう。本仙台高裁の判決にみるような、国の責任をないことにする、あるいは、天災による事故を免責にしようとする姿勢では、今後、原発の高経年化も加わって、従来以上に大規模な炉心溶融事故を起こす可能性が高くなってくる。原発の大事故を防ごうという強い意志をもった、人と組織を構築しない限り、事故を防ぐことは困難になると考える。何としても、福島事故をあるいはそれ以上の事故を繰り返してはならない。

7. 追加の課題：2023年度に分かった新たな課題

—溶融デブリのコアコンクリート反応の評価と、水蒸気爆発のリスク低減—

事故から10年を経過して、原子力規制庁は、いわゆる「中間とりまとめ」を
発表し、それまで知られていなかった、① ベント管が排気塔筒頂部まで達して
いなかった。② シールドプラグに7京ベクレルという驚くべき高濃度のセシウ
ム137が存在する事などが判明した。そして、今年になって、1号機の原子炉
圧力容器基礎（ペDESTALという）が、核燃料デブリの影響で大きく損傷してい
ることが分かった。

特に本年3月28日、29日に実施されたロボットの遠隔操作による撮影の
結果、ペDESTALの直径5～6m、厚さ1.2mの鉄筋コンクリートが、鉄筋を
残してほぼ全面にわたって失われている事が判明した。

現在、ペDESTALの大規模な損傷を受けて、耐震性の評価を実施することにな
っている。それはそれとして確認が必要だが、もうひとつの再稼働の是非に係る
重要な問題がある。新規性基準では、このような規模の鉄筋コンクリート損傷は
考えていなかったことから、炉心溶融後の評価を全プラントにわたって実施す
る必要がある。また、事故後実施してきていないBWRの再稼働を検討するなら、
今回はじめて分かったデブリ対策の検討が必須であり、すでに稼働している
PWR 原発も、規制基準の見直しが必要である。炉心溶融後のデブリの冷却に関
する対策は水蒸気爆発のリスクも含めて評価してからでなければ、きわめて危
険なので、運転してはならない。

1号機の原子炉圧力容器ペDESTALのコンクリートが、デブリの接触で無くな
ってしまい、鉄筋のみが残された形である。実際にどのようなメカニズムでこ
うした浸食が起きたか、新たな疑問が出てきており、解決まではそれ相応の時間
がかかると考えられる。BWR型のプラントでは、これから再稼働にむけて検討中
の、東海第二原発、女川2号機、柏崎刈羽6、7号機、島根2号機が対象になる
が、炉心溶融後のコアコンクリートの評価と、水蒸気爆発の評価が同時に必要で
ある。鉄筋コンクリートが構造部材としての機能も形状も全く失っている衝撃
的なできごとである。炉心溶融事故におけるコアコンクリート反応（MCCI）が
発生すると、核燃料デブリとコンクリートが反応し、大量のガスと熱を出しなが
ら、コンクリートが浸食される。しかし、福島事故後のMCCIによるペDESTAL
部分のコンクリートの浸食量は約70cm程度とMAAP解析コードで評価³⁾され
ていた。しかしながら、福島事故から12年も経ってはじめて、ペDESTALの大
規模な損傷が明らかになった。また、MCCIを防ぐため、水を入れる必要がある
が、水を入れると、核燃料デブリと水が接触して、大規模な水蒸気爆発を発生す
る危険性が高くなる。事業者も規制当局も、この炉心溶融事故というものが、過
酷事故としてどの程度のことか起きるか想定できていないことがあらためて明
らかになった。原子力プラントの元設計技術者として、極めて深刻な問題である

ことを指摘しておきたい。

資料

- 1) : 資料 1 金属学会論文「海洋構造物の事故と安全性」
- 2) : 資料 2 論文等リスト (教育研究業績書)
- 3) : 資料 3 福島第一原子力発電所事故の概要 (東京電力(株)宮田浩一) ページ 3

海洋構造物の事故と安全性*

後藤 政志

芝浦工業大学工学部

J. Japan Inst. Metals, Vol. 66, No. 12 (2002), pp. 1215-1226
Special Issue on Materials and Technologies for Risk Society
© 2002 The Japan Institute of Metals
Overview

Accidents and Safety Issue of Offshore Structure

Masashi Goto

Faculty of Engineering Shibaura Institute of Technology, Tokyo 108-8548

An offshore structure is not able to avoid the encounter of the severe storm always, because of the characteristic of the purpose which is to stay at the specified sea area for the operation. This paper describes the design method for typical offshore structure briefly, then explains the some accidents of the offshore drilling rig, and finally presents the fundamental idea about the safety issue based on the investigation of the specific technical problems related to the causes of accidents.

Many rigs for Arab, Mexico, Canada and North sea were constructed at Japanese shipbuilding yards between the 1970's and the 1980's followings the world wide rig construction boom. As Japan has a few rigs and a little information about the accidents of the offshore drilling rigs, according to the Lloyd's lists and some reports related accidents, the accidents of the offshore structures occur often as compared with ships and the scale of the accidents is often beggar than normal ship. Norwegian semi-submersible accommodation platform "Alexander L. Kielland" collapsed and capsized due to fatigue failure at the weld part of the brace at North sea oil field in March 1980.

123 lost their lives by this accident. Also jack up rig "Dan Prince" sank in Araskan waters during wet towing in October 1980. These impact the later design philosophy to establish the residual stability requirements and structural redundancy evaluation requirement for the offshore structures.

(Received June 20, 2002; Accepted September 25, 2002)

Keywords: offshore structure, accidents, safety issue, design, semi-sub, jack up, failure mode, residual stability, structural redundancy, Kielland

1. はじめに

本論文は、かつて世界的な規模の建造ブームの中で、日本においても高度成長期の1970年代から1980年代にかけて建造のピーク¹⁾を迎えた海洋石油掘削装置(以降石油掘削リグまたはリグと言う)の開発・設計と事故を例に、海洋構造物の事故と安全性について主として設計の観点から解説を試みたものである。したがって、本論文は最新の石油掘削リグ技術の動向を述べることを目的としたものではなく、かつて民間企業においてその開発・設計に従事した若干の経験から、急成長を遂げつつあった1980年前後の海洋構造物の代表的な事故事例を通してその設計思想の変遷とその技術的意義に関して述べたものであることをあらかじめお断りしておく。

石油掘削リグは、一般船舶と比較してはるかに技術の歴史が浅いが、大型でしかも移動可能な構造物として特異な形式をしており、技術的に従来にはない新しい設計概念が次々と導入されていた。日本はそうした新しい技術を欧米から導入し、ある面では未消化のまま(この見解が、一般的に同意を

得られるかは、さだかではないが、少なくとも筆者の体験の中ではそのように感じられた。)建造に着手した。もちろん当時、設計・製造の現場では様々な工夫と改善がなされた事は間違いないし、それが日本の海洋部門の技術力アップに繋がったことも確かであろうが、そもそもが新規の技術であることと、技術導入それ故に技術の基本的な部分の把握のしかたに限界があったこともやむを得ないことかと考える。しかしながら、世界中で幾つかの大規模な事故も経験していることから、新しい技術の開発・設計に際して事故を起こさないように、あるいは不幸にして事故が起きてしまった場合、事故の被害を最小限に留めるために、実際の事故はどのような形で起こるかを分析し、また逆に起きた事故が設計思想にどのような影響を与えたか検討してみることは重要なことであり、また海洋構造物の分野では、それをかなり直接的に見ることができると考え拙稿を発表する所存である。従来、構造破壊事故事例として、『A・L・キーランド号²⁾』の事故は多くの研究者による報告³⁾がなされているが、同事故を海洋構造物の技術的な特徴との関係から構造・復元性・救命設備等総合的な視点で、明確に位置付けたものは少ないと考える。そのような背景から1980年代の海洋構造物の2,3の事故事例とその後の設計の考え方に関して、不十分な部分があると思うが筆者の考えを述べたもので、構造物の安全性を考

* 2002年3月28日日本金属学会春期大会において発表

える上で、多少なりと他分野の方々のご参考になれば幸いである。

2. 海洋開発と海洋構造物

海洋開発とは、この地球表面の約 70% の面積を占める広大な海において、エネルギー資源の開発、鉱物資源の確保、海洋スペースとしての活用、動物性蛋白質の食糧としての確保、地球環境問題に関わる調査等非常に多岐にわたる活動で、今後益々発展が期待されるが、そうした活動において洋上に建造・設置される構造物を広い意味で海洋構造物と言う。したがって、代表的な海洋構造物を目的から分類すると石油掘削リグ、海洋石油・ガス生産設備、海流・潮流発電プラント、波力発電プラント、洋上石油備蓄基地、海上空港、海上ホテル・都市、埋立式人工島、コバルト・マンガン団塊開発設備、各種消波装置、沈埋トンネル、海洋牧場・海洋生物増殖プラント等が挙げられる。

3. 代表的な海洋構造物の型式

海洋構造物の中で最も代表的なものが海洋石油関連の構造物であり、生産用の場合は固定式プラットフォームが主で、試掘等は移動式の石油掘削リグが使用され、稼動時は一定海域に留まるがある期間が過ぎると他の海域へ移動可能な特異な形式が採用される場合が多い。ただし、最近は大深度で比較的小規模の油田開発のために、中古のタンカーを改造して(新造タンカーを使用する場合もあるが経済上理由から中古タンカーを利用する例が多い)大型の係留システムを備えた浮遊式石油生産システム(FPSO: Floating Production, Storage and Off-loading)が適用されている。

4. 海洋石油掘削リグの技術的な特徴

海洋石油掘削リグをさらに稼動時の形式から大別すると、浮遊式と海底にトラス形式の脚(以下レグと言う)を着け船体を持ち上げる甲板昇降式リグ(以降ジャッキアップ型リグと言う)に分かれ、浮遊式は自航能力のある船型・自航能力のないバージ型とさらに稼動時の波による動揺特性を改善した半潜水式リグ(Semi-Submersible Rig)をセミサブ型リグと言う。)に分類される。石油掘削リグは移動可能であり、かつ稼動時には位置保持をし、水深数十から数百メートルの海底を、さらに海底数千メートルにわたって掘削用パイプとドリルを用いて掘るため波等による動揺特性を軽減することが最も重要な機能となる。したがって、船型やバージ型より、ジャッキアップ型かセミサブ型が主流となっていった。ジャッキアップ型は稼動時に海底に脚を下ろし船体をジャッキアップ(ジャッキユニットというモーター等で主船体を水面上に持ち上げる。)し波による動揺をなくすため水深 120 m 以下では安定性とコスト面で優れているが、水深が深くなると限界あり、それ以上の水深ではセミサブ型の採用が多い。セミサブ型は没水体からコラムを立て半潜水状態で稼動するため通常の船型やバージ型と比べて波による動揺特性が大幅に

改善されている。ただし、位置保持のために大型の係留装置を備えており、稼動水深が深くなるほどその規模も大きくなる。通常のリグの構成は、主船体(ハル)、位置保持装置、掘削設備、ヘリポート、居住設備等からなり、これにジャッキアップ型リグはレグとジャッキシステムが、セミサブ型リグは係留装置、バラスト調整システムと船体動揺を吸収する掘削補助システムが付加される。

石油掘削リグの安全性に関わる技術的な特徴を挙げると下記のようになる。

4.1 風、波、潮流に抗して位置保持

船舶は通常荒天な海域を回避するが、石油掘削リグに限らず海洋構造物はその目的から荒天時も定位置に留まり厳しい外力に耐える必要がある。

4.2 一般船舶と異なる従来にない構造様式

ジャッキアップ型(着底式)とセミサブ型(浮遊式)はそれぞれ形状・型式が一般船舶と比較して、特殊な形式であり、浮遊安定性(転覆しにくい特性: スタビリティまたは復元力特性と言う)上あるいは構造強度的に、必ずしも冗長度が十分とは言いがたい形式が存在する。また、技術の歴史が浅く稼動実績が少ない為、新形式の構造物の稼動経験上のフィードバック情報が少ない。

4.3 狭い部分に大荷重が集中する構造

板厚 6~7 mm の薄板溶接構造と板厚 20 mm から 100 mm を越すような極厚の溶接構造が混在し、高張力鋼も多用されている。ジャッキアップのレグと船体との荷重伝達部やセミサブのコラムとブレースや主船体との接合部(Fig. 5 参照)等トラスあるいはラーメン構造で一般船舶と比較して非常に大きな荷重が一点に集中するような構造が多い。

4.4 波浪の繰り返し荷重と構造的応力集中部の存在による疲労損傷の可能性

セミサブのブレース接合部、ジャッキアップのトラス部材接合部等、構造的な応力集中部の存在は避けられない場合が多く、また、高張力鋼を多く使用するが、疲労強度の検討は重要である。(一般に高張力鋼は静的な強度ほど疲労強度は上がらない)。海水中の疲労は鋼材の疲労強度曲線(S-N 曲線)が大気中の場合と異なり、繰り返し数 N が 10^7 以上でも疲労限が存在せず、所謂腐食疲労となるので小さいが繰り返し数の多い荷重の評価が設計上重要となる場合があるので注意を要する。

4.5 厳しい腐食環境の存在

没水部およびスプラッシュゾーンの鋼材の腐食は海洋構造物の設計上重要である。防食技術としては塗装と電気防食が利用されるが、スプラッシュゾーンとは水面付近で波浪による乾湿の繰り返しを受ける部分で特に厳しい腐食環境として厚膜の塗装等の対策が取られる。海水腐食に関しては通常船級協会が構造部材に対して 2.5~3.5 mm 程度の腐食度を規定しているが、固定式のジャケットでは年間 0.8 mm もの板

厚衰耗が生じた例も報告されている。一般船舶ではあるが、1997 年日本海で沈没したタンカー『ナホトカ』の事故は船体の腐食による強度不足が原因であったとされている⁴⁾。

4.6 移動時の安全性、特に荒天時の浮遊安定性能と曳航速度が遅いことによるリスクの増大

海上輸送は常に自然環境条件に左右される。石油掘削リグは曳航速度が通常数ノット(1 ノットは約 1.8 km/h)から 10 数ノット以下であり、気象・海象の変化を十分予測しないと嵐に遭遇する危険性が高い。

4.7 浮遊時の船体動揺による過大な荷重

特にジャッキアップリグは曳航時に 100~150 m の高さのレグを主船体上方に上げているので船体動揺による大きな慣性力が働きレグや主船体を損傷する危険性がある。

4.8 係留システムの安全性

セミサブ等浮遊式では大規模な係留装置を備えるが、係留用ケーブル等が破断すると衝突、座礁等の事故に繋がる可能性がある。

4.9 衝突・落下・火災等の事故によるリスク

石油掘削リグは稼働海域において、サプライボートやクレーン船等様々な支援船舶が行き来するため、衝突による倒壊、転覆、沈没、火災等の壊滅的な事故に遭遇する危険性を有している。また、元々、海洋石油を掘っているため、時には石油の噴出制御に失敗する暴噴(ブローアウト)や火災・爆発の危険を伴う。掘削作業用のドリルパイプ等の資材をデリック(掘削用の檣)上から誤って落とすこともある。こうした中小規模の事故に対してそれが二次的に大規模な事故に発展する危険性を有している。

5. 海洋構造物の設計

5.1 海洋構造物の設計概要

石油掘削リグを中心にした海洋構造物の設計方法を概説する。稼働海域や適用法規・船級規則を与件として発注側が稼働海域の稼働水深、風・波・流れ等の海象条件、ヴァリアブル・ロード(掘削用機材等の石油掘削リグに搭載できる合計質量で、船舶で言う載荷重量)、必要により係留条件等の要求仕様を設定する。船級規則というのは、日本海事協会(通称 NK)、米国の ABS⁵⁾、イギリスのロイド(LRS)、ノルウエーのノルスケベリタス(DNV)⁶⁾等に代表的される各国の船級協会が制定する船舶や海洋構造物の技術基準であり、国際的な統一規則も制定されており、基本的部分は大きくは変わらない。基本計画としては、基本構造形式と主要寸法・区画配置・構造計画・主要機器配置を検討する。基本性能計算を経て構造設計が実施される。一般船舶が長い歴史の中で構築されてきた規格計算(所謂 Design by Rules)による設計が多く部分を占めているのに比較して、海洋構造物は、直接解析による設計(所謂 Design by Analysis)が主流で、風や波、潮流から外力を計算し、その外力に対して基本性能計算

や構造解析を実施して設計していくことが多い。これは海洋構造物の歴史が浅いことに加えて一般船舶に比べて構造形式が多様であり、規格計算が適用できない部分が多いからである。

5.2 外力の設計条件

設計上重要な点は、まず外力の算定であり、風・波に関しては当該海域の過去の観測データから稼働状態では 50 年、サバイバル状態では 100 年の再現期間をそれぞれ考えた風速、波浪を用いることが多い。

通常、設計風速は、船級協会規則等で最小値が与えられ、稼働状態であれば 36 m/s(70 ノット)、サバイバル状態(再現期間 100 年)で 51.5 m/s(100 ノット)である。

5.3 波浪と流れおよび流体力の算定

波浪による設計は、特定の「設計波による方法」(「決定論的方法(Deterministic method)」)と不規則波による「統計論的予測方法」がある。海洋の波浪は元来不規則な性質を有しているが、「設計波による方法」は、①長期波浪統計データから再現期間を考慮して個別最大波を求め、それを設計用の規則波とする方法と②波高と波周期の組み合わせをいろいろと変えて規則波中の応答(波による運動や応力)を求め、その応答が最大となる規則波を設計波とする 2 つの方法を比較し、両者の内応答が大きくなる規則波を設計波と定義する方法である。これに対して波浪の不規則性を考慮した波浪スペクトルによる「統計論的方法(Stochastic method)」が用いられる場合もある。

実際の設計条件は海域によるが、カナダ沖等サバイバル状態における最大設計波高は 30~35 m にもおよぶ。また、海域により流れの影響も考慮する必要がある。

与えられた波浪、流れに対して構造物に働く流体力を計算する方法は、ポテンシャル理論を用いる方法とモリソン式という抗力と質量力の和として求める方法がある。前者は、流体力を①静水中の浮体の動揺によるラジエーションフォースと②入射波が浮体に直接与えるフルードクリロフ力および入射波を散乱させる時に生じるディフラクションフォースの和(波強制力)および③粘性による粘性減衰力の合力として求められ、一般に没水体を有する浮体の動揺解析等に用いられる。他方後者のモリソン式は、海底に固定された杭のような細長い構造物の流体力を計算するための式で波浪中で運動する細長い浮体の計算によく用いられる。

6. セミサブ型リグの特徴と設計

6.1 セミサブ型リグの形状と稼働状態

セミサブ型リグの稼働時および移動時の説明図を Fig. 1 に示す。セミサブ型リグはフーチングという楕円体の浮体またはローハルという 2 本の長手方向に細長い柱状の没水体の上に太いコラムを立て、型式によりブレースと言うトラス部材を配置し、コラム上部にアッパーハルを載せた立体骨組み構造物で、移動時は喫水を浅くして船体抵抗を小さくし、稼働時はバラスト水を入れて半潜水状態にして、動揺を

軽減させる。

6.2 セミサブ型リグの動揺特性

通常の船型とセミサブ型の横波中における上下方向の動揺特性を比較した模式図を Fig. 2 に示す。横軸に波周期を、縦軸に波による浮体の上下振幅を波高で無次元化した上下揺振幅応答倍率を模式的に示したものである。実際の設計で考慮すべき波周期は約 20 秒以下であるが、波周期が数秒から 20 秒において、セミサブ型は入射波に対する上下揺振幅の応答倍率は大幅に低減される⁷⁾。ローリング(横揺れ)やピッチング(縦揺れ)についてもセミサブの応答のピークは長周期側に大きくずれ、船型と比べて動揺特性は飛躍的に改善される。これは、ひとつには船型と比べてセミサブは水線面積を小さくしたことで、水面の変動による浮力の変動が小さくなることとして直感的に理解できるが、厳密な流体力の解釈によると、ある波周期で波浪強制力を構成している、フルードクリロフ力とディフラクションフォースの位相が逆になり打消しあって波浪強制力はほとんどゼロになる点があり⁷⁾、それがセミサブ型の特徴である。

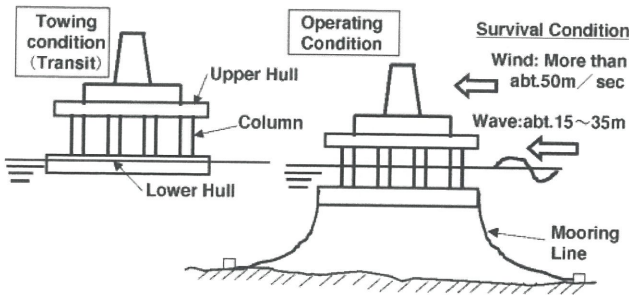


Fig. 1 Operating & towing condition of semi-submersible rig.

6.3 セミサブ型リグの安定性能(復元力特性)

セミサブ型の開発の目的は前述のように、動揺軽減だが、それが浮体の安定性能(復元力特性)に与える影響を検討してみる。Fig. 3 に排水量、長さ、幅を同じにした船型(バージ)とセミサブ型の試設計による比較結果を示す。排水量 16000 トン、長さ 70 m、幅 50 m として、8 本コラム型のセミサブ型の浮体を試算してみる。まず、喫水面の水線面積を比較すると、バージ型 3500 m²、セミサブ型 512 m² と後者は前者の約 15% しかない。これは、どこかに一定の浸水あるいは、同じ荷重をかけた時、セミサブ型の方が 6 倍(=1/0.15) 以上深く沈むことを意味している。また、浮体を横に傾けた場合の復元力はメタセンタ M (浮体は見かけ上メタセンタ位置で吊り下げられた振り子のように動く)の位置と重心 G の距離 GM に比例するが、 M と浮心 B との距離 BM は浮体の水線面の中心軸回りの 2 次モーメント I_w に依存し、 I_w/Δ (ただし Δ : 排水量) で計算される。重心 G の高さを形状から仮

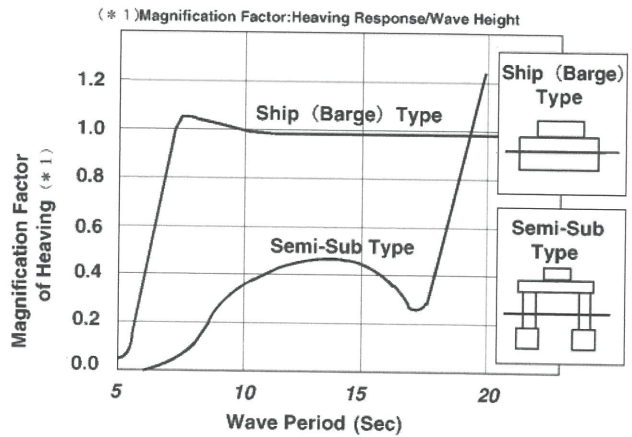


Fig. 2 Motion characteristic of semi-submersible rig. This figure rewritten from a figure in Ref. 7).

	Ship type (Barge)	Semi-sub type
Configuration	Displacement Δ : 16000 ton B: 50 m L : 70 m Draft : 4.5m	Displacement Δ : 16000 ton L : 70 m Draft : 14.8m
Water plane	50m 70m	38m 70m 8m x 8m
Water plane area : A_w	3500 m ²	512 m ² (abt. 15%)
Moment of inertia : I_w	729000 m ⁴	187500 m ⁴ (abt. 26%)
Stability Characteristic (for Heel)	$KG : 9m$ (assumed) $KB : 2.25m$ $BM = I_w/\Delta = 46.3m$ $GM = KB+BM - KG = 39.6m$	$KG : 15m$ (assumed) $KB : 5.37m$ $BM = I_w/\Delta = 15.9m$ $GM = KB+BM - KG = 6.3m$
GM	39.6 m	6.3 m (abt. 16%)

Fig. 3 Stability of semi-sub.

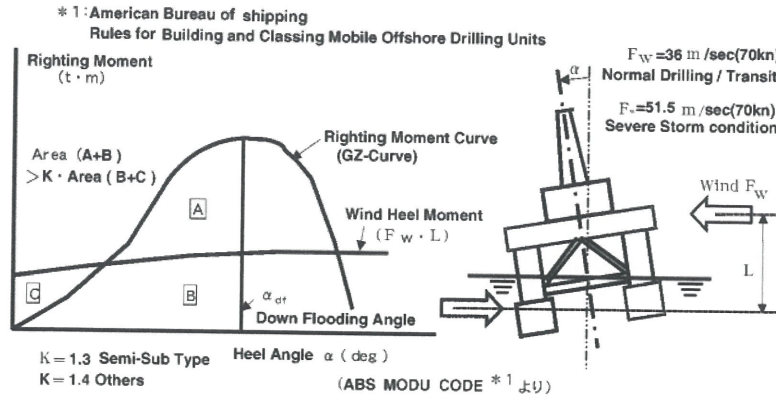


Fig. 4 Dynamic stability curve.

定して、GMの値を計算すると、バージ型では40m近くになるのに対して、セミサブ型では6.3mと後者は前者の16%程度しかない。セミサブ型は通常のバージ型に対して風等の外力や浸水による同じ転倒モーメントに対して傾斜する角度が数倍程度(1/0.16≒6倍)大きいことつまり外力に対して傾き安いことを意味している。動揺を低減できるセミサブ型は、船型に比べて小規模な浸水や風等の外力により転覆し易い特性を持つと言える。

この比較は、形状や重心高さ等多くの仮定の上の議論であるため、厳密ではないが、船型(バージ型)とセミサブ型の復元力特性の違いを良く表している。

6.4 動的復元力特性

風荷重による浮体の転覆に関する安全性は、前述のGMの算定と共に Fig. 4 に示した動的復元力曲線⁵⁾により評価される。横軸にリグの傾斜角度αを縦軸に復元モーメントをとると、この復元力曲線の下側の面積がその角度までリグを傾けるのに必要な仕事量を意味する。リグの傾斜によりある開口が浸水を始める角度を海水流入角(ダウンフラディング・アングル)α_{df}として、風荷重によるリグを傾斜させるモーメントを風力傾斜モーメント(ウィンド・ヒールモーメント)として復元力曲線に重ねて描くと、復元力による仕事量つまり面積(A+B)が、その角度までリグを傾斜させる為に必要な外力(風荷重)がする仕事量つまり面積(B+C)より大きければ、エネルギー論的にみて転倒しないことになる。

6.5 セミサブ型リグの構造設計

Fig. 5⁷⁾ に2-ロワーハル型のセミサブの代表的な構造を示す。セミサブのロワーハルやコラム、アッパーハル等は全体構造解析に先立って、船舶と同様な防撓板構造として、甲板荷重や各種の機器や搭載物の自重、タンクのオーバーフローを考慮したタンク内水圧や外板の波浪変動水圧、外板損傷浸水時の水圧、係留力、船舶の接舷時の荷重等に対して規格計算や局部強度解析が行われ板厚、防撓材が仮決定される。

セミサブの全体強度を検討するには、静的な重力・浮力の他に、複雑な流体力や船体動揺による動的な荷重を考慮する必要があり、有限要素法(FEM)を用いて立体骨組み構造解析を行うが、稼働時(半潜水状態)とサバイバル状態(半潜水

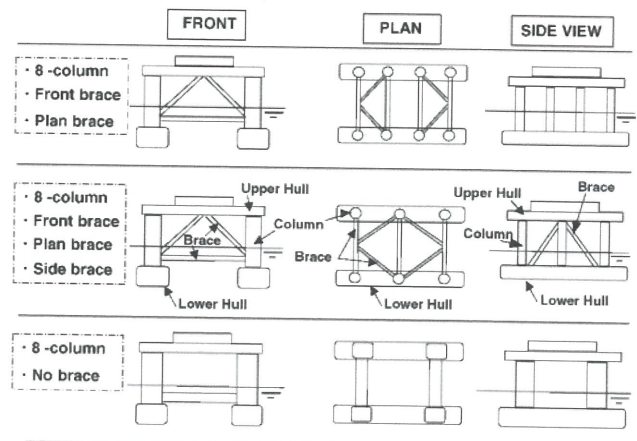


Fig. 5 Typical configuration for 2-lower hull type semi-sub rig. This figure rewritten from a figure in Ref. 7).

状態ストーム時)と移動時に対して解析し各部材の応力評価を行う。波による変動荷重を考慮した全体構造解析の考え方には浮体としての運動応答と弾性構造体としての構造応答を同時に考慮して解く弾性構造応答モデルによる解析と、運動応答と構造解析を別々に分けて2段階で解析する方法がある。前者はメガフロート(1995年からメガフロート「超大型浮体構造物」技術研究組合で大規模な実験研究が行われている。)のように構造体の弾性変形を考慮して浮体の運動を解く必要があるものすなわち構造体の変形と流体力の相互作用を考慮する必要のある場合に用いられる。セミサブのような構造全体を剛体とみなしても影響の少ない構造体では後者のように浮体の運動と構造の解析を別々に切り離して行うのが一般的である。

また、セミサブのブレースの接合部は疲労強度が支配的になる場合があるため、詳細なFEM解析にて局所的な高応力であるホットスポットのピーク応力を求め一般部に対する応力集中係数として評価しておき、全体構造応答で求めた部材応力に、応力集中係数を掛け合わせる形で疲労強度検討用の応力を求める。石油掘削リグの設計耐用年数として20年間に遭遇する最大波に対する応答を求めておき、波高別の発生頻度を考慮して発生応力を求めSN線図(疲労強度線図)を用いて、線形マイナー則により累積被害度を求める。

DNV では、疲労強度評価方法を部材の変動応力の長期分布としてワイブル分布を適用して複雑な設計手順を体系的にまとめている。

7. ジャッキアップ型リグの特徴と設計

7.1 ジャッキアップ型リグの形状と稼動状態

ジャッキアップ型リグの稼動状態および移動時の概要を Fig. 6 に示す。移動する時は、レグを上げジャッキアップ型リグが主船体の浮力で浮いた状態でタグボートで曳航することをウェットトウと言い、短距離の移動や長距離でも初期のジャッキアップ型リグではよく用いられた。その後曳航速度を速めると同時に曳航時の事故のリスク(事故事例を後述するが)と保険料を低減するために、長距離の移動時は他の曳航用のバージに搭載して移動するドライトウが主流となった。ドライトウは、サブマージブルバージと言うバラスト水で潜水可能な専用のバージを半潜水状態にして、その真上にリグを引き込みエアブロー(圧縮空気)でバラスト排水してバージの浮力でジャッキアップリグをすくい上げてバージに搭載する。一般に大型の海洋構造物は数千トンから数万トン

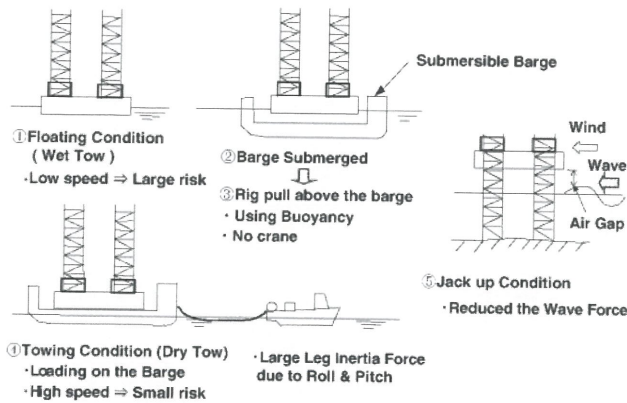


Fig. 6 Operating & towing condition of jack up rig.

になるため、その移動や設置等工事全般にわたって極力クレーンを使わずに水の浮力と重力を利用して、浮体を沈めたり浮かしたりあるいは洋上でひっくり返したりして姿勢制御する技術が発達している。

代表的なジャッキアップ型リグの外観図とジャッキアップ時の荷重のかかり方の説明図を Fig. 7 に示す。

7.2 ジャッキアップ型リグの技術的特徴

7.2.1 ジャッキアップ時の設計上の課題

ジャッキアップ型リグは、稼動時には、レグを海底に下ろし下端にあるフーチングにより全体の質量を支えている (Fig. 7 右図参照)。主船体(ハル)は浮遊時に箱型のバージとして多くの区画に水密隔壁で仕切られた構造をしており、水圧や甲板荷重に対する防撓板構造として船級規則による規格計算で設計されるが、質量軽減のため高張力鋼を採用する機会が多い。ジャッキアップ時には、リグ全体の構造設計上は、3本のレグで支持された、水平方向縦横に張り巡らされた梁構造(主船体を水平面内の骨組み構造にモデル化する。)として強度計算する。

稼動時あるいはサバイバル状態においては、風や波と流れによる水平方向の荷重によるレグ下端周りのオーバーターニング(転倒)モーメントが生じる。オーバーターニングモーメントにより、水平荷重が加わった側のレグ下端の反力がマイナスにならない(レグが浮き上がらない)こと、反対側のレグ下向きの荷重が支えられること、さらにその下向きの荷重によりフーチングが海底地盤で支えられることである。この時ジャッキアップリグ全体の安全にとって重要な観点は、海底地盤の耐荷力の確認であり、ジャッキアップ時の海底地盤の破壊や陥没は最悪の場合リグの転倒を招く。しかも、海底土質の力学という通常の鋼構造物の強度と比べてはるかに不確実な要素をもつ性質のものである。よって、地盤強度をボーリング等で確認した上で、水面上少しだけジャッキアップした状態を保ち、あらかじめサバイバル時のオーバーターニング・モーメントによる最大地盤反力を計算しておき、その最大荷重に相当する質量のバラスト水をハル内にあるレグ周囲

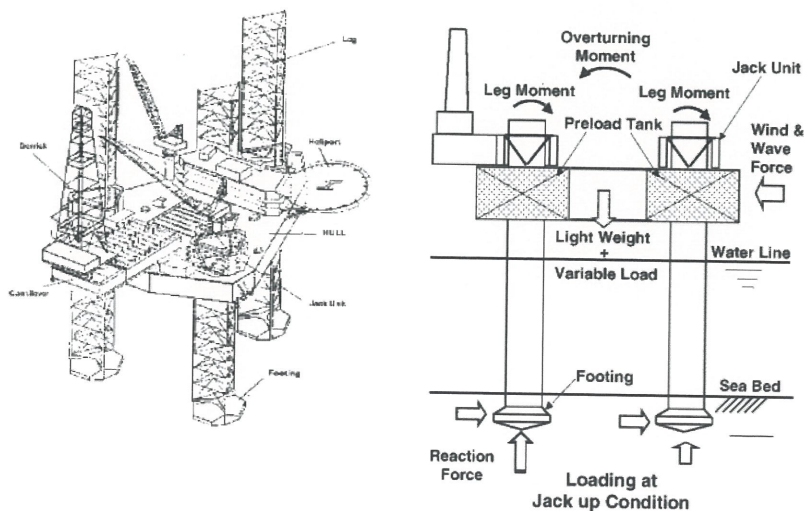


Fig. 7 Configuration of jack up rig.

の区画(プリロードタンクと言う)に注水し、地盤の圧密等を考慮して十分な時間(通常 24 時間程度)プリロードをかけた後バラスト水を捨て、地盤の強度を確認した後 所定の高さまでジャッキアップしてリグとしての稼動に入る。このプリロードで確認できた地盤強度、つまり想定したストーム状態まで転倒に対する安全が確保されたことになる。このプリロードが、ジャッキアップの転倒安全性を保障する重要な概念であるが、それでも時にはレグが急貫入する場合があります。筆者も試運転のプリロード中に約 1.5 m 程度の急貫入を経験している。幸いレグが損傷する事態は免れたが、その時の緊張感は設計に携わる者として生涯忘れることはできない。

レグの強度はレグのトラス構造全体の座屈強度とレグトラス部材の軸圧縮部材としての座屈強度および、荷重伝達部の局所的な強度(パンチングシェア：面外せん断破壊)に支配される。レグに対するハルからの曲げモーメントのかかり方はジャッキユニットのタイプすなわち、フローティングタイプかフィックスタイプで異なるが、ジャッキユニットをハルに溶接で接合したフィックスタイプ(Fig. 7 左図参照)のジャッキユニットでは、ハルからの曲げモーメントを各レグの上下方向の偶力として生じる鉛直力にして荷重伝達するため、強度的に有利であり、レグ径を小さくでき、鋼材重量を低減できるが、細くしすぎると、座屈強度の低下やレグの急貫入に対する尤度(強度上の)が減少する。

7.2.2 曳航時の設計上の課題

水深 120 m 級のジャッキアップ型リグのレグ長さは 150 m を超える長さとなり、曳航時はこのレグをハル上方へ上げた状態で行うため、重心が高くなり、復元力特性および慣性力による構造強度が重要な技術課題である。

レグにかかる曲げモーメントや、ジャッキユニットにかかる荷重は、ジャッキアップ時より厳しい場合もある。しかもこの曳航時の荷重は繰り返し荷重であるため、構造強度上は疲労強度が重要となる。この曳航時の荷重に対抗するために、時にはレグの上部を一部はずして曳航し、稼動海域に行ってから洋上でレグを接合する方法⁸⁾も用いられている。

曳航時の検討条件は、船級協会等の機関で与えられるが、一般には片振幅 15~20 度で、周期 10 秒程度の船体動揺を考慮した慣性力に対して強度検討を行っている。

8. 海洋構造物の事故統計

世界中で石油掘削リグの建造量が急激に増加した 1970 年から 1980 年当時の移動式プラットフォームの事故統計を Fig. 8 に示す。特徴的なことは、移動式プラットフォーム(移動式リグとリグ以外の同様な構造物を含む)の事故で全構造損傷事故の内、全損事故が 9% もあり、それに重大損傷事故を加えると全体の約 1/4 を占めることである。また、全構造損傷事故を起因事象別に分けると、Fig. 9 に示すように、天候、衝突、暴噴(ブローアウトと言う。制御に失敗し原油やガスが噴出すること。)が上位を占め、次に構造強度、火災が続く。海洋構造物にとっていかに自然条件が厳しいかわかる。同時に構造強度が原因となることが無視し得ない比率であることがわかる。また、別の事故に関する報告⁹⁾に

Accidents statistics of Mobile Offshore Platform in world wide operation during 1970-1980 (according to initiating event and extent of structural damage) Produced from Lloyds' list

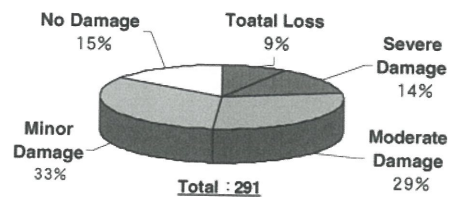


Fig. 8 Number of accidents for mobile offshore platform.

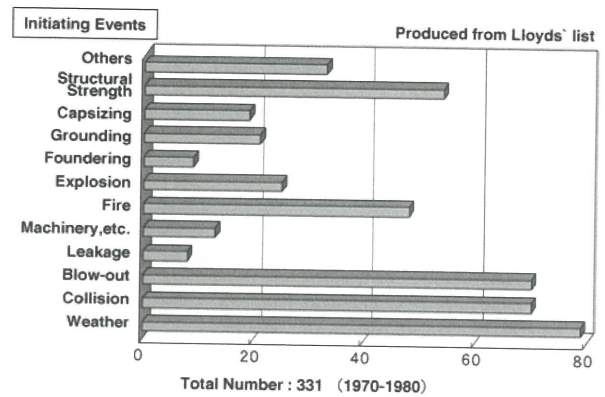


Fig. 9 Accidents statistics of Mobile Offshore Platform based on each initiating event.

よると稼動中に比べて曳航時の石油掘削リグの事故が半数以上を占めると言われている。

9. 代表的な海洋構造物の事故事例

海洋構造物の代表的な全損事故事例を取り上げ、その技術的な原因や背景に関して若干の考察を加えてみる。事故事例の情報は一般になかなか入手したい場合も多く、必ずしも正確で十分な情報を網羅できているとはいえない面があるが、手元に入手できた事故報告書や一部の解説等を参考に設計上の特質を踏まえて技術的な課題との観点から筆者の見解を交えて概説する。

9.1 セミサブ型プラットフォーム『アレキサンダー・L・キーランド号』倒壊・転覆事故

9.1.1 『A・L・キーランド号』の概要

1976 年フランスでペンタゴンタイプの 80 人乗りのセミサブ型リグ(Fig. 10/11 参照)²⁾として開発・建造された。船籍はノルウェー、船級は DNV(Det norske Veritas)であり、その後 1978 年に 384 人乗りのアコモデーション(油田の作業員用洋上ホテル)・プラットフォームとして改造され、北海で稼動中であった。

Fig. 11 に見るように、5 つの丸いフーチングの上にそれぞれコラムが立ち、縦横にブレースというパイプで結ばれ、上部の骨組み構造の上にアッパーハル(デッキハウス)を載せた構造であった。

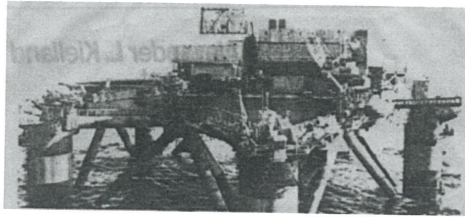


Fig. 10 『Alexander L. Kielland』.

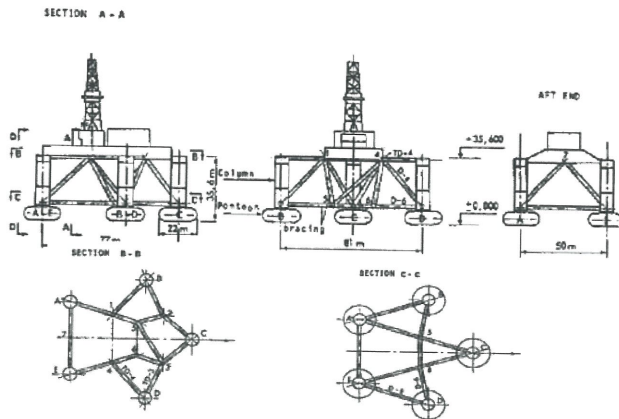


Fig. 11 General layout of 『A. L. Kielland』.

9.1.2 事故の概要と解釈

1980年3月、北海で稼働中に Fig. 12 に示す直径 2.6 m、板厚 26 mm の水平方向のパイプ『D-6 ブレース』にハイドロフォン(水中音波探知機)用のサポート(直径 325 mm、板厚 20 mm のフランジ付パイプ)を取り付けた隅肉溶接部から疲労亀裂が発生し、『D-6 ブレース』が破断した。波浪による動揺と流体力による各方向の荷重により支えを失ったコラム D とフーチング D が脱落し、復元力を失い急激に傾斜をしはじめデッキハウスの端部が没水し約 35 度程度傾斜した状態で一旦小康を保つ(Fig. 13 参照)が、その後デッキハウス内に浸水し約 20 分程度で転覆²⁾した。

9.1.3 構造破壊・転覆のプロセスと改善項目

事故報告から再現したキーランド号の事故の全体プロセスを Fig. 14 に、また事故シナリオから作成した FT (Fault Tree) を Fig. 15 に示す。FT を作成することは、必ずしも簡単とは言えない場合も多いが、可能な範囲で検討ツールとして用いることは、どのレベルで事故の進展を食い止めるべきかを検討する上で有効である。

まず設計段階で構造強度部材であるブレースに付属品(ハイドロフォン・サポート)を付けることを構造設計部門が知っていたのか、設計部門間の技術情報の伝達に関する疑義があったこと。また、仮に取り付けることを構造設計部門が了解していたとした場合にもブレースの疲労強度をきちんと評価していなかったのではないかと推測される。特に疲労強度部材に隅肉溶接を採用することは問題であり、この種の構造強度設計上は欠陥を残しにくい全面溶け込み溶接を採用するのが常識的である。次に製作・施工であるが、疲労亀裂の起点の破面に塗料が付着していたことから、施工時に欠陥が

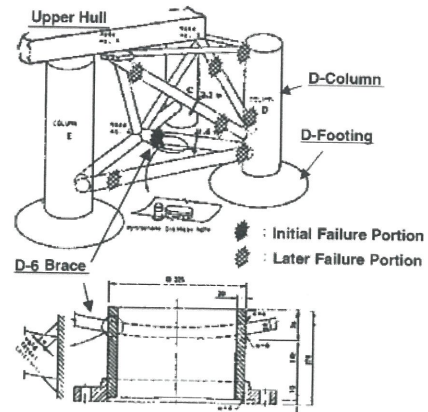


Fig. 12 D-6 Brace failure location.

Upper Hull (Deck House) Flooding
Heel abt. 30~35 deg. after broken D-column.

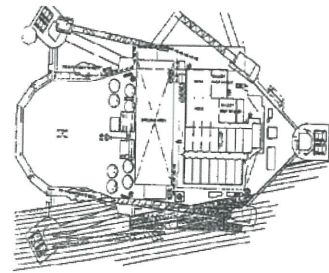


Fig. 13 Progressive flooding condition of 『A. L. Kielland』.

あったと推測され、それは目視検査や非破壊検査等でも発見できなかった。このブレースは水中に没する細長い部材であるため、浮力による曲げモーメントがかからないように孔を空けて水密構造にしていなかったことが、点検時に亀裂を発見しにくかったのではないかと指摘もなされている。なお、こうしたセミサブ型リグのブレースの疲労は、当時必ずしもはじめてというわけではなく、キーランド号より以前 1965 年頃日本で建造された米国籍の 3-フーチング型セミサブ『セドコ 135 型』でも後部水平ブレースの形状変化部(応力集中部)に次々と疲労亀裂が発見され、この種の構造物の疲労強度設計の重要性が認識されていたとも言われている。

技術の先端における情報交換の重要性を改めて感じさせる事例である。さて、こうして直径が大きいとは言えパイプ構造のブレースの疲労亀裂はある大きさに成長し、不安定亀裂となるかあるいは、荷重伝達面積が不足し、過大な応力となり急激に破断したと推測される。通常の船体構造では、板に縦横に防撓材を配置した防撓板構造を縦横に組み合した箱型構造をしているため、一部材の破壊がすぐ全体の崩壊に繋がることは、脆性破壊のような不安定破壊でない限りまず生じないと考えて良い。これは、ブレースのような軸力部材からなるトラス構造と箱型の防撓板構造との違いで、前者ではトラス部材の破壊がその部材の耐荷力を喪失させ、その荷重を他の部材が支えきれずに次の破壊が生じ、直ちに構造全体の不安定な破壊に繋がる可能性があるのに対して、後者は荷

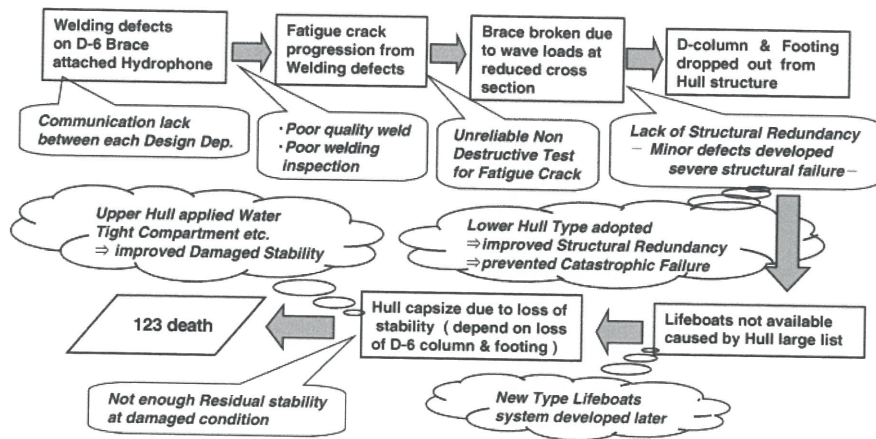


Fig. 14 Structural failure & capsizing process for 『A. L. Kielland』.

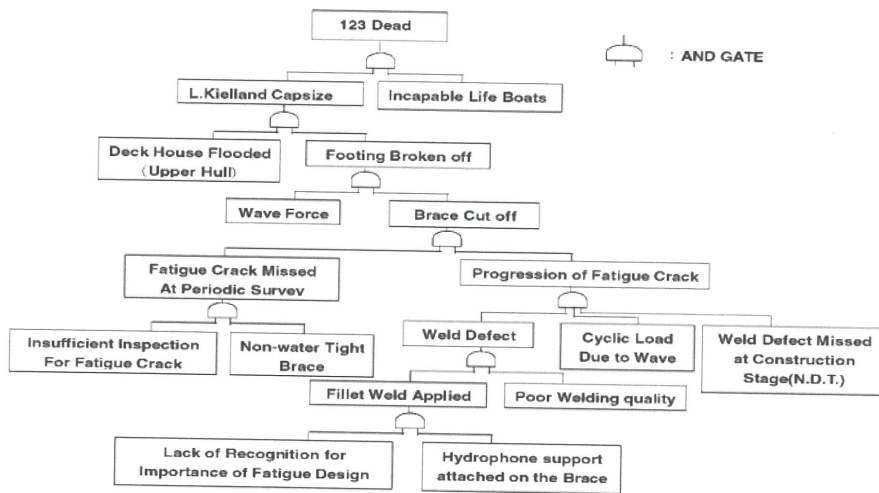


Fig. 15 Fault Tree of A. L. Kielland accident.

重伝達経路が複数存在し、ある部材の損傷後、荷重の再配分が生じ他の部材が肩代わりしてくれる可能性が高い。つまり、構造強度上の冗長度が両者では明確に異なる。冗長度の違いはトラス部材と防撓板構造の座屈強度についても同様な傾向にある。トラス部材(軸圧部材)は軸圧縮力によりオイラー座屈を生じると、耐荷力を急速に失いそのまま崩壊してしまうのに対して、防撓板では、まず防撓材で囲まれたパネルが面外に座屈するが、その後さらに荷重を増やしていくと、応力の再配分が生じ、防撓材近傍の板が荷重を支え、防撓板構造全体の座屈あるいは防撓材近傍の断面(座屈後の有効幅)が降伏するまで耐荷力¹⁰⁾は上がっていく。つまり、設計上は所詮許容応力設計がベースになるが、終局強度を考慮した設計を考えれば、構造様式に合わせたより合理的な設計が可能となる。その場合最も重要なことは、その部材の破損モード、例えば材料の降伏であるか疲労であるか座屈であるか、それらの破損モードの発生する可能性を見落とさないことである。その意味で安全性の観点からは解析精度の問題より、むしろ、どのような破損モードを考慮したかということがより重要と言える。ブレースが破断するとコラムとフーチングの脱落まではこの構造形式(Fig. 11/12に見られる立体

トラス構造)と荷重条件からみると防ぎようがないもので、フーチング型のセミサブはブレース破断がそのままリグ全体系の崩壊に繋がる可能性があることが分かる。よってブレースに過大な荷重がかからないように離散的に浮力を受け持つフーチング構造をやめ、2本の大きなローワーハルを持った形にし、かつ両者を何本かのブレースで結合した設計とし、さらに万が一ブレースが破断した場合のセミサブ全体構造の冗長度の解析を行い強度面における従来より一段深いレベルの設計思想を採用するようになった(Fig. 16 参照)。また、Fig. 5 の下段に示すようなブレース無しで4-コラム型のラーメン構造とするセミサブ型リグも建造されている。大型ラーメン構造の場合は、例えば疲労等でコラム接合部等に亀裂が入っても、部材が大きく、曲げ荷重主体であるため、全断面が破断するまで相当の時間を要すると考えられ、最終破断に至る前の定期検査時に十分亀裂を発見できると考えられる。

9.2 損傷時復元力特性の新規定と救命艇設備の改善

一般船舶においても、衝突や座礁、外板の構造損傷等から浸水し、沈没あるいは転覆等の大事故なることを防ぐため、構造強度設計とは別に、1区画あるいは2区画の浸水が

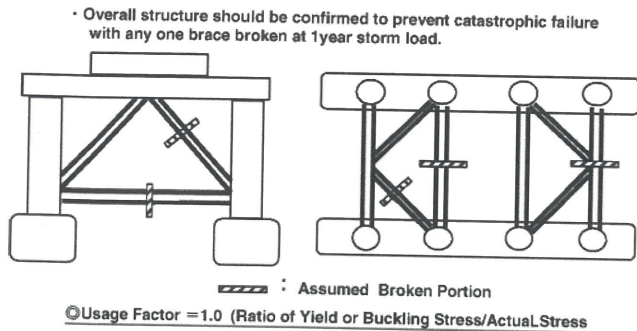


Fig. 16 Redundancy overall structural analysis for semi-sub.

生じたと仮定して損傷時復元性の検討をしている。しかしながら、後述の『オーシャン・レンジャー号』や『A・L・キールランド号』の事故にみられるようにセミサブ型の復元性能が厳しいので、海洋構造物の損傷時の復元性に関してセミサブのコラム外面からの損傷範囲等を厳格に規定し、かつ損傷後の風による傾斜角度からさらに7~10度程度(ABS/DNV)の動揺があっても転覆しないよう詳細な技術基準が造られた。

また、フーチング脱落后、しばらくはアッパーハルが浸水しなければ、傾斜はしても転覆を免れた可能性もあるため、その後の設計では上部構造物の一部に浮力を持たせる設計を要求するようになった。

さらに、傾斜したリグから救命艇を降ろす時、多くの救命艇が構造部材に当たったり、船体動揺の為に水面に降ろせなかったことが指摘され、その後の厳しい環境下で使用可能な救命艇および降下設備の開発が行われた。

9.3 セミサブ型リグ『オーシャン・レンジャー号』沈没事故

『A・L・キールランド号』の事故から2年後の1982年2月、カナダのニューファウンドランド島沖の太平洋上で、当時世界最大級(長さ約122 m/幅約80 m/稼動水深480 m/掘削深度約7600 m/1976年に日本で建造カナダの石油会社所有)のローハル/8コラム型のセミサブ型リグ『オーシャン・レンジャー号』が半潜水状態でバラストコントロールに失敗して沈没し、84名が死亡した。この事故は、セミサブのコラム外板に取り付けられた小さな窓が荒天下で破れそこからバラストポンプ室に浸水し、セミサブリグの姿勢制御用のポンプが作動したまま制御不能に陥り、そのコラムの浮力が大きく失われ、転覆したもので、すでに述べたセミサブ特有の浮遊時安定性能に深く関わる事故である。この事故以降船級規則でもコラム外板に構造強度上弱点となるような開口を開けることを禁止すると共に、主要な機器類の遠隔操作や自動化を含む制御システムの設計の改善をうながした。

9.4 ジャッキアップ型リグ『ダン・プリンス号』沈没

9.4.1 『ダン・プリンス号』の概要

この石油掘削リグは、米国リビングストン社のクラス111型として開発され、日本に技術導入され日本の造船所で1976年に『ボルグステン・ドルフィン』⁸⁾として建造(Fig.

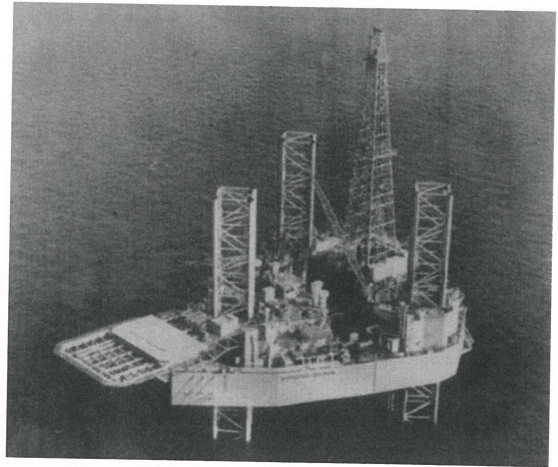


Fig. 17 『Dan Prince』 at jack up condition (Borgsten Dolphin).

17参照)された米国の船級協会『ABS』のジャッキアップ型リグで、リベリア船籍、稼動水深約90 m、掘削深度約6000 m、長さ約90 m、幅約54 m、レグ長さ約127 mのフローティングジャッキユニットタイプである。元々、メキシコ湾内で使用することを考慮して設計されたもので、レグ下部のフーチングはハル下部から出ており、曳航時はウエットトウに限られ、10000馬力(BHP)のタグボートで約4ノット(約7.2 km/h)と非常に曳航速度が遅い。その後売却されて『ダン・プリンス号』として就航した。

9.4.2 事故の概要

1980年10月アラスカ沖でウエットトウで曳航中に風速約32 m/秒、波高約15 mのハリケーンに遭遇し、船首前方に大きく張り出したヘリポートがピッチングにより波に叩かれて崩壊、甲板上に固縛が甘かったドリルパイプ等の機材が船体動揺(片振幅約20度、周期約10秒のローリングとピッチング)によりぶつかり、デッキハウスやハッチコーミングの甲板上の構造物に損傷を与えた。また、長いレグにかかる慣性力がジャッキハウス(甲板上にジャッキユニットを納めるように設置された構造物で、レグとハルとの荷重伝達にとって最も重要な構造物)の甲板接合部に幾つもの亀裂を生じた。大きな亀裂は長さ約5.5 mにも達し、それらの亀裂からハル内部の各区画に大量の水が浸水した。甲板からの浸水だけで何故沈没したのか不明であり、どこか外板の損傷した可能性もありうるが、船体動揺によるレグの慣性力が事故の主要な要因のひとつであることは間違いない。曳航時の疲労強度が問題になる甲板の上部構造との接合部等は亀裂が発生しにくいよう、構造設計上の十分な配慮が必要であった。

9.4.3 『ダン・プリンス号』沈没のプロセスと改善項目

『ダン・プリンス』号の事故の全体プロセスをFig. 18に示す。曳航速度の遅いジャッキアップリグのウエットトウでは、事前の気象・海象の正確な情報の提供が決定的に重要である。嵐に遭遇してから、船体動揺を軽減するためにレグを水中に降ろすことも実施されたが、それでもこの事故を防ぐことはできなかった。また、曳航前のドリルパイプ等機材の固縛が不十分といった基本的な準備の不備が事故原因の一部

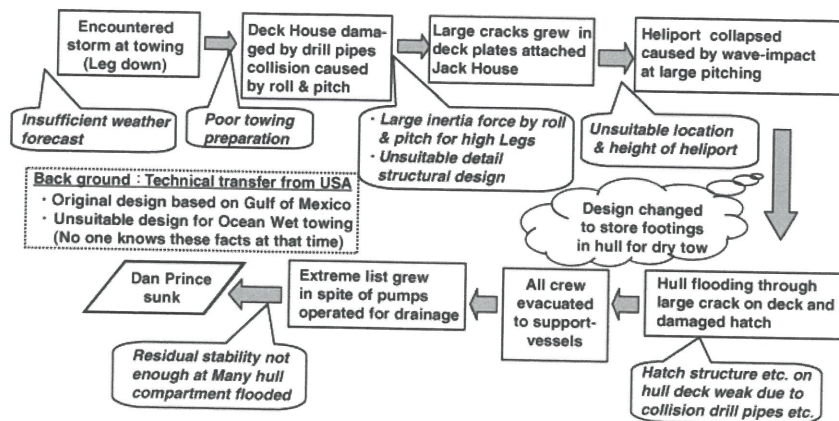


Fig. 18 Sinking process for 『Dan Prince』.

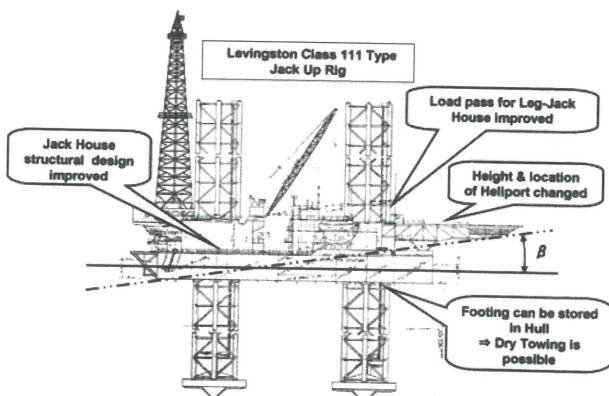


Fig. 19 Design improved items after Dan Prince accident for jack up rig.

を構成している。ローリングとピッチングによるレグにかかる慣性力により、ジャッキハウス等上部構造物の甲板接合部に亀裂が生じ、ヘリポートが波で叩かれ落下する等の構造損傷は、設計上の基本的な問題であるが、本リグがメキシコ湾を対象として開発されたジャッキアップリグであり、日本に技術導入した時点で気がつくべきであったとも思うが、当時の経験の少ない日本の技術陣にとっては難しい問題であったと考える。その後日本で開発したリグにおいてはこうした設計上の経験が生かされた。具体的には、Fig. 19 に示すようにまず①ヘリポートの設置高さを上げ、さらに水平面内の位置としてリグの斜め前方に位置を変えることで、ピッチング角度 α が少なくとも 20 度あるいはそれ以上まで没水しないような設計にすること。また、没水する可能性のある場合は、ヘリポートのパネルを取り外し可能な構造とする。②レグとジャッキハウスの荷重伝達機構を変えること。それはジャッキユニットをフローティングタイプからフィックスタイプに変更しジャッキハウスの構造を抜本的に変えることを意味する。③ジャッキハウスの甲板への取り付け構造の見直し。④そして最も基本的な問題として、フーティングをハル(船体)内部に収納可能なようにし、リグをバージに搭載しドライトウ可能な設計とする等である。

10. 事故の遺産と冗長度を考慮した安全性評価

セミサブ型リグは、ローハル、コラムと比較して相対的にブレースが細いため、疲労、衝突等何らかの原因でブレースが損傷すると部材として完全に破断することも想定されることは、「キーランド号」の事故で示された。その後、セミサブのブレース部材に関しては、Fig. 16 に示すように、原因の如何にかかわらず、いずれかの 1 本のブレース破断を想定し、荷重として 1 年再現期間確率の波浪外力でも全体構造の崩壊に至らないことを確認することが要求されるようになった。DNV 等で、こうした冗長度解析 (Redundancy Analysis) を規定した。リグの基準としてノルウェー(石油関係を含む)では、通常の構造設計に加えて、前述の構造冗長度の解析の他に、過大な荷重に対する終局限界状態の解析、および損傷後の進行性崩壊限界状態 (Progressive な破壊) の解析等を規定している。具体的には 5000 トンのサプライボートが 2 m/s で衝突しても全体構造の崩壊に至らないことおよび、甲板上 17 m 上方から質量 30 t の落下物 (ドリルパイプ等) があっても事故の拡大に至らないことを求めている。

船舶の設計では、前述したように外板が破れて浸水した時に、1 つないし 2 つの区画が浸水したと仮定して損傷後の復元力特性を確保する設計をしている。こうした設計思想は他の分野、特に原子力プラントで行われている多重防護の考え方と近い。海洋構造物の設計において、部材損傷や一部の事故条件を考慮しても全体系が壊滅的な被害を起こさない様な設計思想を要求するのは、セミサブ型リグの事故がその特性故に部分的な改良では、事故の連鎖を確実に絶つことが困難であるとの認識から来ていると思われる。新しい技術は常に新しいリスクを負う可能性があること、特にセミサブやジャッキアップのような従来一般船舶に比べて技術的にすぐれた性能を持つものは、その反面他の技術的な弱点が出てくるものであることを教訓とすべきものとする。新しい概念による重要な構造物の開発・設計に当たっては、“技術の失敗の事例”を総合的にとらえると共に、技術の基本にもどって再評価することが重要で、特に、小さな損傷が全体系のカタ

ストロフへ至る事故の連鎖をどこのレベルで防護できるか、損傷モードと冗長度に関する深い洞察が必要であり、そのためには、構造強度における終局状態の簡便な推定方法の研究が望まれる。

11. ま と め

事故に関する情報はなかなか表に出にくいものであるが、技術の発展にとって重要なものであることは論をまたない。海洋構造物の設計に携わった経験から、少し古い事例であるが、設計の概要と共に過去の2~3の事故事例について考察し、構造・復元性能を含めて安全性に関する議論を展開したが、筆者の力量・知識不足等による誤りあれば、ご指摘いただければ幸いである。

株式会社モデックおよび元三井海洋開発関係の方々から多くの有用な資料を提供いただいたことをここに感謝いたします。また、論文執筆にあたり広くかつ高い見地からご指導いただいた東京工業大学・大学院情報理工学研究科・瀧口克己教授に感謝の意を表します。

文 献

- 1) The Society of Naval Architects of Japan: *Nihon Zosen Gijutsu Hyakunensi* (1997) p. 298-302.
- 2) T. Moan: The Alexander L. Kielland Accident, Proceeding from The First Robert Bruce Wallace Lecture, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute Technology, 1981, p. 1,4-7, 11, 18, 19.
- 3) K. Inoue: Kaiyo Kozobutsu ni okeru kozoanzensei, Bulletin of The Society of Naval Architects of Japan 825, 1998/3, p. 157-161.
- 4) K. Sao: Kaiyo Kogaku Kenkyujo Syuppanbu, *Jyuyū Osen/Ashita no Tameni* 1998, p. 309-312.
- 5) *Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units*, 2001, American Bureau of shipping (ABS).
- 6) *Rules for Classification of Mobile Offshore Units*, Det Norske Veritas(DNV), 1996.
- 7) K. Yoshida K. Motozuna, Y. Kumakura and Y. Takahashi: kyocho, *Kaiyo Kogaku no Kisochishiki*, Seizandosyoten, 1999, p. 136, 25, 137.
- 8) MODEC, *JACK-UP RIG Kenzo no Ayumi*, p. 22-27, 58.
- 9) H. Maeda, K. Nishimoto and K. Masuda: Casualty Statistics of Offshore Structure, 7th OCEAN ENGINEERING SYMPOSIUM, 1984, The Society of Naval Architects of Japan, p. 97.
- 10) Y. Yamamoto, H. Otsubo, Y. Sumi and M. Fujino: kyocho, *Sen-tai Kozou Rikigaku*, Seizandosyoten, 1986, p. 78-90.

教育研究業績書

2005年 9月25日

氏名 後藤 政志 印

著書、学術論文等の名称	単著、共著の別	発行又は発表の年月	発行所、発表雑誌等又は発表学会等の名称	概要
(学位論文) 『大規模構造物の設計とリスクを考慮した評価方法に関する研究』 (博士論文)	単	平成 16年11月	東京工業大学大学院 情報理工学研究科 工学博士論文 (2005/3 授与)	過去30余年にわたって設計・開発・試験評価等を行ってきた海洋構造物と原子炉格納容器を事例に大規模構造物の設計とリスクを考慮した評価法を提示した。前半で海洋構造物の技術的特殊性と事故の関係を論じ、後半で原子炉格納容器の耐圧・耐熱・耐震試験の破壊試験結果をまとめ、設計と耐性および安全性の関係を論じた。リスク評価手法の現状と問題点を指摘し、事故から学ぶ面と事故を予防する観点から設計へのフィードバックの重要性を指摘した。
(著書) 1. 転換期の技術者たち －企業内からの提言－田中直編	共著	平成 1年5月	勁草書房 (全238頁)	各分野の技術者が、各産業分野においてどのような形で仕事をしているか第1戦の技術者による現場報告としての単行本。 (全体概要) 石油・半導体・コンピュータ造船の各分野の報告。 (担当部分概要) pp. 139 - 199 第3部『造船：失速した王国のゆくえ』事故と安全性へのこだわりを池田論として執筆。1970年代から1980年代の海洋開発の設計現場の状況と海洋構造物の安全性および技術としての生き方を論じた。 (著者名)：田中直、山中博、北川義雄、池田論
(学術論文) 1. Seismic Proving Test of a Reinforced Concrete Containment Vessel (RCCV) Part2: Results of Shaking Table Tests	共著	平成17年	Nuclear Engineering and Design NED235(2005)1349-1371	RCCV耐震実証試験の振動試験結果についての総合的な報告。 (全体概要) 入力波と躯体の応答、せん断力、ライナの評価、AEの評価等を報告。 (担当部分概要) pp. 1349 - 1351, 1357 - 1359 試験概要および加圧試験と加振試験手順。試験結果としてライナのせん断座屈および亀裂発生についての評価。 (著者名)：Toshihiko Hiram, Masashi Goto, Keiji Shiba, Toshio Kobayashi, Shizuo Tsurumaki, Katsuki Takiguchi, Hiroshi Akiyama
2. Seismic Proving Test of a Reinforced Concrete Containment Vessel (RCCV) Part1: Test Model and Pressure Test	共著	平成17年	Nuclear Engineering and Design NED235(2005)1335-1348	RCCV耐震実証試験の総合的な試験計画。 (全体概要) 実機と試験体のモデル化検討、試験体設計、スケール則、漏洩率試験および加圧試験の変形・ひずみ等の結果、アコースティックエミッション(AE)の方法と加圧試験の結果等をまとめた。 (担当部分概要) pp. 1335 - 1337, 1343 - 1346 試験概要および実機とモデル化検討、試験体ライナー設計、加圧試験、リクエスト計画および結果 (著者名)：Toshihiko Hiram, Masashi Goto, Toshiyasu Hasegawa, Minoru Kanechika, Takahiro Kei, Tsutomu, Mieda, Hiroshi Abe, Katsuki Takiguchi, Hiroshi Akiyama

3. 海洋構造物の事故と安全性	単	平成 14年12月	金属学会誌 「リスクベースの材料工 学・材料技術」解説論文 第66巻第12号(2002)	金属学会で発表した半潜水式海洋構造物の の事故に関する発表内容を元に依頼により 金属学会誌特集号に解説論文として発表。 (全体概要) 1980年代に起きたセミサブ型 プラットフォーム『アレキサンダー・キーン』号の事故を 動揺性能と復原性能、疲労強度、崩壊強度 の関係を論じ、安全性と設計の考え方を提示 した。
4. High-temperature leak- Characteristics of PCV hatch flange gasket	共著	平成5年	Nuclear Engineering and Design 145(1993) pp. 375-386	原子炉格納容器の耐性評価研究の一環とし て耐熱限界上最も厳しいフランジガスケット の実験結果と評価を発表した。 (全体概要) 高温時の挙動とリーク特性試験を行い、格納 容器の耐熱限界とガスケット形状、フランジ 開き量、放射線被曝量等のパラメータに対す るリーク限界温度と圧力の関係を求め、熱に 対するシリコンゴムガスケットの耐熱限界 を求めた。 (担当部分概要) 全体構成、試験計画、耐熱試験結果まとめと リーククライテリア線図 (著者名) 375, 384, 385, 386 Katsumi Hirao, Toshiyuki, Zama, Masashi Goto Yoshihiro Naruse, Koichi Saito, Takuro Suzuki, Hiroyuki Sugino
(国際会議発表論文) 1. Global FE Analysis of a Reinforced Concrete Containment Vessel under Ultimate Internal Pressure	共著	平成14年	Proceedings of the 1 st Fib Congress (Fib 2002) W-455(1/10-10/10)	鉄筋コンクリート製原子炉格納容器の加圧限界挙 動試験の報告 (全体概要) 汎用FEM解析コード ABAQUSを用いたRCCV全体 モデル加圧破壊の非線形解析に関する報告。 (担当部分概要) : pp. 1/10, 10/10 本解析の目的と背景および ABAQUS の鉄筋コン クリートへの適用に関するベンチマークの結果を報告 特に試験結果との突合せに関するまとめ。 (発表者名) Yoshinori Mihara, Yasuaki Fukushima, Hiroo Ito, Yasumi Kitajima
2. Integrity Test for Reinforced Concrete Vessel (RCCV) Part2. Simulation Analysis of Bi - Axial Tension Tests	共著	平成14年	Proceedings of the 1 st Fib Congress (Fib 2002) Session 11 "Safety of concrete Structure. pp.191 - 198	鉄筋コンクリート製原子炉格納容器の加圧限界挙 動試験の報告(その4) (全体概要) RCCV 加圧破壊試験の部分試験の二軸引張に ついて解析を行い試験結果と比較した。 (担当部分) pp. 191, 193 概要で本試験の背景や海外(米国 SNL) の試 験との関係をまとめ結論で 2 軸引張試験結 果と解析が十分あったことをまとめた。 特に、ライナーのバネのモデル化による解析結 果の意義について述べた。また試験全体のプ ロジェクトリーダーとして全体をまとめた。 (発表者名) Toshiyasu Hasegawa, Toshihiro Hirama, Hitoshi Kumagai, Kiyo-omi Kanemoto, Masashi Goto Yasumi Kitajima
3. Integrity Test for Reinforced Concrete Vessel (RCCV) Part1. Test Results under Bi - Axial Tension	共著	平成14年	Proceedings of the 1 st Fib Congress (Fib 2002) Session 11 "Safety of concrete Structure "pp.183 - 190	鉄筋コンクリート製原子炉格納容器の加圧限界挙 動試験の報告(その3) (全体概要) RCCV 加圧破壊試験の部分試験で、ライナー 付きの開口部を模擬した二軸引張試験結果の 報告。

				<p>(担当部分概要) pp. 183, 185, 186 試験の背景特に、米国 SNL のライ付き格納容器加圧試験試験結果のリーク挙動から、全体モデル試験をせずに部分モデル試験の組合で RCCV 全体のリーク限界および破壊限界を把握する方法と試験計画を述べた。 (発表者名) Toshiyasu Hasegawa, Toshihiko Hirama, Hitoshi Kumagai, Kiyo-omi Kanemoto, Masashi Goto, Yasumi Kitajima</p>
4. Basic Element Tests of Reinforced Concrete Containment Vessel with Anti - Plane Pressure	共著	平成 14 年	Proceedings of the 1 st Fib Congress (Fib 2002) Session 11 " Safety of concrete Structure " pp. 363 - 372	<p>鉄筋コンクリート製原子炉格納容器の加圧限界挙動試験の報告 (全体概要) RCCV 加圧破壊試験の部分試験で、ライナーと R C 部の面外挙動を調べた基礎的な試験結果の報告。 (担当部分概要) pp. 363, 364, 366, 367, 371 試験の背景、試験体パラメータ、試験結果の内ライの亀裂に関する部分および結論を述べた。 (発表者名) Naohiro Nakamura, Yasumi Kitajima, Masashi Goto Masahiro Sugata, Atsushi Kambayashi,, Naoto Yabusita</p>
5. Outline of a RCCV Seismic Proving Test Results	共著	平成 11 年 10 月	27 th Water Reactor Safety Meeteing (WRSM27)1999 (43-4-1)	<p>米国 N R C 主催の国際会議にて発表した RCCV 耐震実証試験の概要報告。 (全体概要) ABWR 型 RCCV の大型振動台を用いた耐震試験計画と試験結果を報告。 (担当部分概要) 試験概要、加圧試験およびリーク試験結果 (発表者名) S.Tsurumaki, Y.Sasaki, H.Akiyama, M.Goto,</p>
6. Pressurization test on the equipment Hatch model	共著	平成 9 年 8 月	14 th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 14) (H01/3 1997)	<p>NUPEC における原子炉格納容器のハッチフランジ試験報告。 (全体概要) 実機スケールモデルの加圧試験と解析結果報告。フランジが開口することによりリークする場合のリーククライテリア提示。 (担当部分概要) 全体計画およびクライテリア設定。 特に民間側プロジェクトリーダーとして試験全体に関与。 (発表者名) Arai S, Matsumoto T, Goto M, Naruse Y, Mieda T, Yamanaka H</p>
7. Study for Ultimate Capacity of Typical BWR Containment Vessel in Japan	共著	平成 7 年	The 3 rd JSME / ASME Joint International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-3) 1995	<p>日本の B W R 型鋼製原子炉格納容器を試験と解析を組み合わせる各型式毎に圧力・温度線図上で限界領域を求めた総合的研究。 (全体概要) B W R 型原子炉格納容器の型式マーク I、マーク I 改、マーク II、マーク II 改毎に耐性評価線図を作成した。 (担当部分概要) 全ページ作成および発表破損およびリークに関するクライテリアを設定し、各種試験結果および解析結果をまとめた。 (発表者名) Masashi Goto, Yoshihiro Naruse, Koichi Saito, Tadashi Kume, Takuro Suzuki, Hiroyuki Sugino, Yoichi Nishimuera, Akihiro Sakashita</p>

8. Evaluation of BWR Containment Vessel Performance in Japan - Elastic-Plastic Analysis of selected Containment Vessel Regions	共著	平成 5 年 8 月	12 th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT12 (U03/2) 1993)	日本における BWR 型鋼製原子炉格納容器の加圧に対する解析評価 (全体概要) 各格納容器型式毎に、シェル一般部、トップヘッド、シェル貫通部の FEM 弾塑性解析を実施し限界圧力を評価 (担当部分概要) pp. 予備解析のスクリーニング、解析結果比較の実施 (発表者名) K.Hirao, K.Kume, T.Suzuki, M.Goto, H.Sugino
9. Proving Tests on Fission Product Behavior at Severe Accidents	共著	平成 4 年	International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants (1992) (ANP92) Proceedings, Vol III, Session 23 pp. 23-6-1~23-6-7	苛酷事故時の原子炉格納容器の有機シール材部分からの放射性物質の漏洩に関する信頼性試験 (全体概要) NUPEC で実施したフランジガスケットや電気配線貫通部の有機シール剤にリークガスができた時の放射性エアロゾルの挙動を把握する基礎的な試験 (担当部分概要) pp. 6-1, 6-2, 6-3 原子炉格納容器の設計データから実機貫通部を模擬した試験体設計および試験条件の提示、評価結果の解釈 (発表者名) H. Nariai, K. Takumi, M.Goto, A. Watanabe, M. Sato,
10. Pressure Test of the Typical Vessels Flange under Pressure Loading	共著	平成 3 年 8 月	11 th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT11 (J02/4) 1991) pp. 25-30	シビアアクシデントを対象とした原子炉格納容器のフランジ部の加圧試験 (全体概要) 典型的なハッチフランジおよびトップヘッドフランジの試験体による加圧・漏洩試験結果の報告。フランジの開口量と漏洩開始時期のクライテリア設定の根拠をつくった。 (担当部分概要) p. 25, 26, 30 計画の背景、試験計画、フランジ開口量と漏洩の関係をもとめた。 (発表者名) K.Hirao, M. Goto, Y.Naruse, H.Sugino, K.Saito K.Hasrgawa
その他原子力関連の国際会議への 発表論文多数 (鋼製格納容器、コンクリート製格納容器 放射性物質漏洩・捕集試験関連)				
(国内学会講演論文集) 1. 高温にさらされる鋼板コンクリート構造に関する基礎的な研究 その2実験結果の検討	共著	平成 14 年	日本建築学会大会 学術講演梗概集 (北陸) 2002 (21505) pp. 1009 - 1010	鋼鉄コンクリート構造に熱を加えた場合の鋼鉄、アンカー、コンクリート躯体の実験結果に関する報告 (全体概要) 3 種類の試験体の鋼鉄を加熱してマクロな挙動を確認した。特に、熱応力による鋼鉄の座屈が見られたこと、アンカの定着を緩めると座屈しにくくなることおよび曲率が座屈をしにくくさせることを示した。 (担当部分概要) pp. 1010 結果の考察。座屈挙動の評価。 (発表者名) 大山佳伸, 瀧口克己, 堀江篤史, 後藤政志
2. 高温にさらされる鋼板コンクリート構造に関する基礎的な研究 その 1 実験概要	共著	平成 14 年	日本建築学会大会 学術講演梗概集 (北陸) 2002 (21504) pp. 1007 - 1008	鋼鉄コンクリート構造に熱を加えた場合の鋼鉄、アンカー、コンクリート躯体の挙動を実験的に研究するための実験計画 (全体概要) 原子炉格納容器に鋼鉄コンクリート (SC) 構造を採

				用することを想定した基礎試験の計画 (担当部分概要) pp.1007 試験計画および試験体設計をサポートした。 (発表者名) 堀江篤史, 瀧口克己, 大山佳伸, 後藤政志
3. 海洋構造物の事故と安全性 —半潜水式プラットフォームの 事故 から学ぶ—	単	平成 14 年 3 月	金属学会 2002 年春季 依頼講演	1980 年代に起きた半潜水式海洋構造物の 事故を船舶工学およびシステム安全工学の 観点から考察。航空機・鉄道・自動車の 3 分 野と並べて学会で企画された依頼講演。 (全体概要) 海洋構造物の技術的な特徴が事故とどのよ うに関わるかを、半潜水式プラットフォームの復原 性能、構造ランダム性との観点から解説。設計 上何を検討すべきかと意味で他分野の参考 になると考える。 ポイント: 43 頁
4. コンクリート製原子炉格納容器 耐震実証試験 (Ⅱ. RCCV耐震実証試験) その14. 補償加振結果と入力評価	共著	平成 12 年 10 月	日本建築学会学術講演 梗概集 (東北) 2000 (21548) pp.1095-1096	NUPEC の RCCV 耐震実証試験の振動試験キャ リブレーションの方法と加振入力の評価に 関する詳細報告。 (全体概要) 試験体と振動台の実際の動きを検証し、伝達 関数から入力信号を設定した。 (担当部分概要) 1095-1096 試験全体計画との整合性検討を実施した。 (発表者名) 内藤幸雄, 後藤政志, 小林俊夫, 柴慶治, 服部靖, 秋山宏, 瀧口克己
5. コンクリート製原子炉格納容器 耐震実証試験 (Ⅱ. RCCV耐震実証試験) その13. 試験計画と結果概要	共著	平成 12 年 10 月	日本建築学会学術講演 梗概集 (東北) 2000 (21547) pp.1093-1094	NUPEC の RCCV 耐震実証試験の試験計画と試 験結果の概要報告。 (全体概要) 設計条件を超えたレベルにおける耐震裕度 試験の試験体設計と加振手順および試験結 果の概要を報告した。 (担当部分概要) pp.1093-1094 加振レベルの設定、試験結果の評価をプロジ ェクト全体の位置づけからまとめた。 (発表者名) 鶴巻静雄, 後藤政志, 内藤幸雄, 長谷川歳恭, 平川啓司, 三枝努, 秋山宏, 瀧口克己
6. コンクリート製原子炉格納容器 耐震実証試験 (Ⅱ. RCCV耐震実証試験) その5. 試験体と試験手順	共著	平成 11 年 9 月	日本建築学会学術講演 梗概集 (中国) 1999 (21590) pp.1179-1180	NUPEC の RCCV 耐震実証試験の試験体製作と 試験手順に関する報告。 (全体概要) 試験体スケール検討、加振波設定、加振概略 手順、耐圧・漏洩試験検討 (担当部分概要) pp.1179-1180 耐圧・漏洩試験および LOCA 条件における加 圧レベルの設定等。 (発表者名) 高橋敏夫, 後藤政志, 長谷川歳恭, 平川啓司, 鶴巻静雄, 秋山宏, 瀧口克己
7. コンクリート製原子炉格納容器 耐震実証試験 (Ⅱ. RCCV耐震実証試験) その1. 全体計画と試験体基本設計	共著	平成 10 年 9 月	日本建築学会学術講演 梗概集 (九州) 1998	平成 4 年より計画を開始した NUPEC 多度津工 学試験所の世界最大級の振動試験装置を用 いた A B W R 型 RCCV の耐震実証試験の全体 計画および試験体設計報告 (全体概要) 平成 9 年まで実施した試験計画・試験体設計 製作の概要を報告した。 (担当部分概要) 民間側プロジェクトマネージャーとして全体計画、試

				<p>験体基本設計全般に関与。特に、実機から切出しモデルの検討プロセスを実施。</p> <p>(発表者名)</p> <p>松村宏, 後藤政志, 内藤幸雄, 長谷川歳恭, 上田真稔, 三枝努, 服部靖, 秋山宏, 瀧口克己</p>
(その他講演)				
1. 『鋼製およびコンクリート製容器の破壊モードと評価方法』	単	平成 17 年 7 月	日本船舶海洋学会 海洋工学研究交流会 (第 1 回構造部会) 講演 2005/7	旧海洋工学委員会より、容器の破壊およびその評価方法に関する講演を依頼され、学位論文を中心に内圧による破壊試験と構造物の破壊リスクについて解説した。
2. 『リスクを考慮した大規模構造の設計と評価方法』 海洋構造物の事例	単	平成 17 年 5 月	日本 P E 協会依頼講演 2005/5	日本プロフェッショナル・エンジニア (P E) からの依頼により、学位論文の中から、海洋構造物の例を中心に実際に起きた事故と設計・および評価方法について講演した。
3. 海洋構造物の事故と安全性 — 半潜水式プラットフォームの事故から学ぶ —	単	平成 14 年 12 月	日本鉄鋼協会鋼構造物 工学フォーラム依頼講演 2002/12	鉄鋼協会の依頼に基づき金属学会で発表した内容を元に海洋構造物の事故と安全性について講演。ハーフポイント使用
その他技術史研究会等で技術史・技術評論関係の講演多数。				
(解説・総説)				
特に技術史・技術評論等				
1. J R 転覆脱線事故の工学的考察	単	平成 17 年 6 月	雑誌『技術と人間』 2005 年 6 月号	J R 福知山線における電車脱線事故の転倒現象に関する力学的考察と事故原因および事故調査のあり方について問題提起。 (池田論として執筆)
2. 鉄筋コンクリート製原子炉格納容器 (RCCV) 耐震実証試験について	共著	平成 12 年 7 月	FAPIG NO. 155 (2000-7) pp. 33-47	NUPEC の RCCV 耐震実証試験について試験計画から結果概要まで総合的にまとめた報告。本報告だけで実証試験から裕度試験まで本試験の全体像がわかるよう解説してある。 (著者名) 服部靖, 後藤政志, 三枝務, 小林俊夫 平川啓司, 長谷川歳恭, 平間敏彦
3. エアバスは何故墮ちたか	共著	平成 8 年 10 月	雑誌『技術と人間』 1996 年 10 月号	名古屋空港で起きたエアバスの事故における航空機の自動化と安全性についての評論。安全性と自動化の基本的な問題を論じた。 (池田論)
4. 構造設計技術者から見た現代技術	単	平成 8 年 10 月	現代技術史研究会会誌 『技術史研究』N069 「技術分野レビュー」1996/7 pp. 66-77	構造設計とは何かを踏まえて、構造解析技術特に破壊力学等の構造設計への適用とその問題点や各産業分野における構造設計のあり方に対する評論 (池田論)
5. 船はなぜ沈むか — 船の事故とその特徴 —	単	平成 8 年 10 月	現代技術史研究会会誌 『技術史研究』N069 特集「事故はなぜ起きるか—最近の事故事例から考える」1996/7 pp. 12-43	船舶の設計の経験を元に、船舶の操縦性、安定性、構造強度を各船種毎に分析し、実際に起きた事故と工学的意味・自然環境・港湾等施設を論じた。船舶に関わる事故年表を同時に作成した。(池田論)
6. 第 5 回原子炉格納容器健全性 ワークショップ報告	共著	平成 4 年 10 月	日本原子力学会誌 Vol.34. No.10 (1992/10)	米国で行われた格納容器の健全性に関する国際会議の報告を原子力学会誌に掲載。
7. 安全をどこに求めるか 『探掘リグ倒壊でのシステム構成』	単	平成 4 年 10 月	現代技術史研究会会誌 『技術史研究』N067 特集「事故-技術者と社会の接点」1992/6 pp. 28-33	1980 年代に起きた北海における石油掘削リグ『アレキサンダー・キラント号』の事故に関連して事故のプロセスと技術者の責任について論じた。(池田論)
8. 第 2 回「格納容器の運転と設計」 国際会議 報告	共著	平成 3 年 10 月	日本原子力学会誌 Vol. 33. No. 3 (1991/10)	米国で行われた原子力プラントに関する国際会議の概要を原子力学会誌に発表
9. 事故からみた現代技術の脆弱性	単	昭和 63 年 12 月	現代技術史研究会会誌 『技術史研究』N065 特集「事故をめぐる」 1988/12 pp. 26-37, 54	1984 年から 1986 年にかけて発生した、メキシコガス爆発、インド・ボパール毒ガス漏洩事故、日航ジャンボ機墜落事故、スペースシャトル『チャレンジャー号』爆発、ソ連チャルノブイリ原発事故等の大規模な事故がなぜ多発するかを、現代技術の特徴から論じた。これ以降事故論分科会を立ち上げる。(池田論)

(特許) 1. 鋼製ケーソン	単	昭和 55 年頃	三井海洋開発時代に取得	縦長の箱型ケーソンの中に水密隔壁を設けバルブ操作による注水のみでケーソンを90度ずつ回転させて曳航から設置までクレーンを使用せずに姿勢制御を行う画期的なシステム。実用化したのが現在はずでに切れていると思われる。
その他、原子炉格納容器に関する細かい特許数件あり。				
教育方法の実践例, 作成した教科書, 教材	年 月		概 要	
(教育方法の実践例) 1. 芝浦工大工学二部における『科学技術史』講義での実践	平成 13 年 9 月 ～平成 17 年 3 月			工学系ではあるが、職業を持っている学生、持っていない学生、機械系から電気系まで広い分野の学生で、かつ1年から4年まで、バックボーンの異なる学生に対して、主として科学と技術の違い、技術とは何か、実際の技術の現場と物を設計することの意味をいかに教えるかを工夫した。主として、様々な事故事例を元に、事故の原因を説明しその上で、その対象物がどのように設計されているか、また、使われている工学の基本的な考え方を説明した。毎年学生にアンケートをとっているが、大学で学ぶ工学と実際の設計の橋渡しになる講義として学生からは非常に高く評価されている(アンケート調査結果あり)。講義の要点は ① 実務と工学の橋渡しをした。 ② 様々な分野の工学の基礎(主として機械・船舶・航空機・プラント・土木・建築の基礎工学)を平易に解説した。 ③ 事故の事例を具体的に工学的な観点を中心に解説した。 ④ 設計技術者としての体験談を豊富に取り入れた。 ⑤ できるだけ、ビジュアルな図や写真を多く用いた。 ⑥ 講義はパワーポイントを主体にし、毎回講義用資料を配布 ⑦ 技術がやるべきこと、考えるべきこと等技術者倫理と技術者としてどこに誇りを持てるかを議論した。
(作成した教科書、教材) 1. 上記、芝浦工大講義用に作成した、講義資料	平成 13 年 9 月 ～平成 17 年 3 月			科学とは、技術とはからはじめて、人間が進化していく中で獲得してきた技術の意味、技術の体系、様々な産業分野の技術を事故事例を元に作成した。毎回、約20～30ページ程度の資料を配布した。分野が多岐にわたるため、大変多くの文献、資料を引用している。約15テーマに分けて作成した。
(職務上の実績に関する事項) 1. 原子力発電技術機構『原子炉格納容器信頼性実証試験』委員	平成 3 年頃 ～平成 14 年 3 月			原子力発電技術機構(NUPEC)の同委員会のうち下記分科会委員(東芝) ・可燃性ガス混合挙動試験 ・放射性物質捕集特性試験 ・構造挙動試験(鋼製格納容器/コンクリート製格納容器) 米国サンディア国立研究所/英国AEAテクノロジーと共同研究 放射性物質捕集試験および構造挙動試験は民間側プロジェクトリーダー
2. 原子力発電技術機構『耐震信頼性実証試験』委員	平成 5 年頃 ～平成 13 年 3 月			NUPEC 多度津工学試験所・大型振動台にて実施した大型格納容器の裕度ならびに破壊試験の民間側プロジェクトリーダー(分科会東芝代表委員) ・鉄筋コンクリート耐震実証試験
3. 東芝原子力プラント設計部にて若手設計者に構造解析の基礎を教育	平成 10 年 4 月 ～平成 14 年 3 月			若手の設計者(約10数人)に材料力学の基礎と構造解析のモデル化について勉強会を主催した。各自にテーマを出させ、解析モデル化検討から、結果の見方等を指導すると共に、構造設計の視点をレクチャーした。解説は、教科書を紹介し、一部講義メモを作成した。
4. 安全保障貿易管理に関して、安全保障貿易情報センター(CISTEC)ABCミサイル兵器専門委員会・委員長および核・原子力関連機器分科会の主査を拝命。	平成 14 年 4 月 ～平成 17 年 8 月 現在			CISTECは、経済産業省の外郭団体で、大量破壊兵器等の法令に関する民間側からの意見をまとめたり役所に提言する組織。各技術の専門家が集まって法の適格性を審議したり、広く安全保障貿易管理法令の普及活動を実施している。 また、社内外で貿易管理の講義を時々実施している。

その他 技術史の研究会等で『技術・設計・エンジニアリング・事故・技術者倫理』等に関して多数講演。

1. 原子力発電所の安全設計

原子力発電所は、深層防護(Defense In Depth)の概念のもとに安全設計がなされている。第一のレベルが「異常の発生防止」、これが破られても次のレベル「事故への拡大防止」を図り、さらには「放射性物質の異常放出の防止」の第三のレベルを備えている。

この深層防護を達成するための原子力安全の基本的な機能として、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」の3つの機能がある。福島事故では、地震後、「止める」、「冷やす」に成功したが、津波により「冷やす」、「閉じ込める」ができなくなった。

「冷やす」機能を有する設備は多重・多段に備えており、通常運転時には給復水系で原子炉水位を一定に維持するように給水流量を制御している。この給復水系が使えなくなった異常状態においては、1号機では、非常用復水器(IC)で原子炉の蒸気を熱交換機により凝縮し、原子炉に戻すことで崩壊熱を除去する。また、2号機以降のプラントでは、原子炉の蒸気で原子炉隔離時冷却系(RCIC)のポンプを駆動し、原子炉に水を補給する。これらで水位が維持できない場合(LOCA等)には、非常用炉心冷却系(ECCS)にて原子炉に注水する設計としており、様々な場合を想定し、種々のポンプ等を設置している。

高圧注水系(HPCI)

自動減圧系(ADS)：HPCI故障時に原子炉を減圧

炉心スプレイ系(CS)：2系統

低圧注入系(LPCI)：2系統

これらのポンプ等は、外部電源が使えない場合に備え、ディーゼル発電機から電源供給可能としている。

それでもなお水位が維持できない場合に備え、アクシデントマネジメント(AM)として代替注水系(復水補給水系、消火系)を準備している。

「閉じ込める」機能は多重の障壁により構成されている。放射性物質の大部分は燃料ペレットに含有されており、このペレットを燃料被覆管に納めている。事故時には、燃料から放射性物質が放出されることが考えられるため、まずは、原子炉圧力容器内に閉じ込めるが、その外側に原子炉格納容器(一次格納施設)があり、BWRではその外側に原子炉建屋(二次格納施設)を有し、五重の壁と呼ばれることがある。

原子炉圧力容器や格納容器には、隔離弁があり、それぞれの容器等のバウンダリを構成している。また、BWRでは、圧力抑制型格納容器となっており、これは、プール水で蒸気を凝縮することで格納容器の圧力上昇を抑制するものである。さらに、事故時に発生する水素による燃焼・爆発を防止するため、窒素を格納容器内に封入(不活性化)している。

原子力発電所の安全設計の基本は、周囲から隔離されてもスタンドアロンで安全を確保するというものであり、電源に関しては、以下のように備えている。

通常運転時は自らの発電機で発電した電気を所内電源として利用しており、所内電源が使えない場合には、送電系統と2回線以上で接続された外部電源を使用する。これらの電源が確保できない場合に備え、母線電圧低で10秒程度で起動する非常用ディーゼル発電機を2台備えている。このような備えにもか

かわらず、全交流電源喪失 (SBO)となった場合には、直流電源 (バッテリー) で作動する IC または RCIC で原子炉の水位を確保するようにしており、SBO 時のさらなるバックアップとしてディーゼル駆動ポンプの消火系で原子炉へ注水できる。さらに、交流だけでなく、直流も無くなったら (全電源喪失) 隣接プラントからの電源を融通することが出来る設備と手順を備えている。

2. 福島事故の原因となった地震・津波とその影響

平成 23 年 3 月 11 日、福島第一原子力発電所では、1～3 号機が出力運転中、4～6 号機が定期検査中であった。午後 2 時 46 分に発生した東北地方太平洋沖地震により、震度 6 強の地震を受け、福島第一原子力発電所の運転中のプラントも原子炉停止し、外部電源が地震の影響で失われたものの、非常用ディーゼル発電機が設計通りに起動し、電源を供給したため、原子炉の冷却には問題は生じなかった。

しかしながら、午後 3 時 30 分過ぎに到達した大きな津波により、原子炉建屋を含む主要建屋の敷地 (1~4 号機で O.P.10m、5,6 号機で O.P.13m) をも浸水し、建屋にも海水が侵入、その結果として、電源盤などの多くの安全設備が使用不能となり、1～5 号機で全交流電源喪失 (1, 2, 4 号機では直流電源も喪失) した。

3. 福島第一原子力発電所 1～4 号機の事故進展の概要

3. 1 1 号機

地震の揺れにより、原子炉は緊急停止し、外部電源が喪失した影響で、主蒸気隔離弁が閉止し、原子炉が隔離された状態となった。この状態で、原子炉圧力が上昇し、原子炉圧力高の信号を受けて非常用復水器(IC)が自動起動し、その後、原子炉圧力容器(RPV)の温度低下率が適正な範囲となるよう運転員が手動で起動・停止操作を実施し、原子炉水位を維持していた。

11 日 15 時 30 分に前後して津波が襲来し、設計基準を大幅に超える津波であったことから、電源供給の動脈にあたる電源盤を含め、電源設備全般が使用不能となり、交流だけでなく直流も含めた全電源が喪失した。全電源の喪失に備えて、隣接プラントからの電源融通手段 (高圧、低圧) をアクシデントマネジメント策(AM 策)として整備していたが、隣接プラントの電源も喪失し、かつ、電源盤の機能も失われていたため、短時間で電源復旧は不可能な状態となった。このとき、津波の影響でほとんどの安全機能を有する設備が使用不能となっていたが、プラント設備の状態を把握することは極めて困難な状態にあり、また、プラント状態の把握のための計装設備も使用できなくなったことから、何が出来るか、何をなすべきか、といったことすら分からない状態に陥っていた。

全交流電源喪失時には、IC にて原子炉水位を維持する手順としていたが、IC が機能せず、また、そのような場合に手順として用意されている低圧ポンプによる原子炉注水のための原子炉減圧もできない状態となっており、炉心水位が低下し、炉心損傷に至った。18 時過ぎに、直流電源が一時的に戻った際に IC を作動させたが、解析上では既に水位が有効燃料頂部(TAF)を下回っており、また、IC の効果も限定的であった。11 日 21 時過ぎに、原子炉水位が確認できるようになり、TAF 以上の指示となっていたが、後日の調査により、このとき既に水位計が誤指示を出していたと推定している。

原子炉圧力は、11 日 20 時過ぎに約 6.9MPa[gage]であることが分かったが、次に測定できた 12 日 3 時前には約 0.8MPa[gage]となっていた。

MAAP コードによる解析によれば、12 日 2 時前には RPV が損傷し、溶融した炉心のほぼ全量が RPV

下部のペDESTAL領域に落下している。この間、逃し安全弁(SRV)の操作はしていないが、炉心損傷の影響で、核計装管の損傷や主蒸気管フランジ部からの漏洩などが生じ、RPV 破損に先立ち、原子炉圧力が低下したものと推定している。

一方、ドライウェル (DW) 圧力は、12 日 0 時頃に初めて指示が得られ、事故の状態を考慮しても過大と考えられる 600kPa[abs](最高使用圧力 427kPa[gage])を示した。その後、DW 圧力は 840kPa[abs]まで上昇し、上記の原子炉圧力の値と比較すると、その時点で RPV と DW とは均圧していたものと考えられる。

消防車による注水ができたのは 12 日 4 時頃であり、炉心が損傷した後ではあるものの、ペDESTAL に落下した熔融炉心とコンクリートとの反応(MCCI)の進展は抑制でき、コンクリート浸食は約 70cm と評価している。

DW 圧力が 600kPa[abs]であることが分かって以降、S/C ベント操作に入り、全電源が喪失していたことにより現場操作を余儀なくされ、作業が難航したが、周辺住民の避難終了を確認後、12 日 10 時過ぎに小弁操作を実施し正門付近の線量が一時的に上昇した。12 日 14 時過ぎに大弁を操作し、この段階で DW 圧力が低下し、ベントに成功したが、正門付近の線量は上昇していない。なお、当時の風向を考慮した場合、当該ベント等による FP の拡散経路上では、周辺と比べて相対的に線量が高くなっている部分は見あたらない。

12 日 15 時過ぎに原子炉建屋が爆発し、当初、原因が直ぐには判明しなかったが、炉心損傷にともなう水-金属反応で生じた水素が原子炉建屋に漏洩し、これが爆発したものと推定した。1 号機の爆発は、原子炉建屋オペレーティングフロアの壁が横方向に抜ける形となり、天井部分はそのままとオペレーティングフロアに落下したため、外観上は床が見えない状態となっている。これは、1 号機のオペレーティングフロア壁の構造が鉄骨構造であり、爆発による過圧で早い段階で損傷し、爆圧が直ぐに抜けたことで生じたものと考えられる。

PCV から水素が漏洩する経路としては、ベント-非常用ガス処理系(SGTS)ラインの逆流の可能性を完全には否定できないが、電源喪失時閉の流量調整ダンパがあること、それにも係わらず原子炉建屋が著しく汚染していること、PCV ヘッドフランジのシールは漏洩ポテンシャルが高いことから、このシール部から漏洩したものが支配的と考えている。

3. 2 2号機

地震の揺れにより、原子炉は緊急停止し、1 号機と同様に原子炉が隔離された状態となった。運転員は手順に従い原子炉隔離時冷却系(RCIC)を手動起動することで原子炉水位を確保し、原子炉圧力は SRV の自動開閉により安定的に維持されていた。原子炉水位高(L8)で RCIC が自動停止したが、12 日 15 時 39 分に手動で再起動した。

津波により直流電源を含む全電源が喪失し、プラントパラメータの監視ができず、RCIC の制御もできなくなったが、津波による影響が出る前に RCIC を再起動したことから、その後、約 3 日間にわたり RCIC により原子炉水位を維持できていた)。この間の RCIC の運転状態については、電源喪失していることで RCIC が L8 でトリップせず、原子炉水位が主蒸気管付近まで上昇していることから、RCIC タービンが二相流で駆動されていたものと推定している。このような運転状態では、単位体積当たりのエンタルピーが高い冷却材が流出することになるので、これを仮定することで、原子炉圧力が低めに維持さ

れたことを説明できる。

また、この間、DW 圧力が通常予想される圧力より低く推移したが、類似プラントである 4 号機では、S/C 外側のトラスルームに津波によるものと思われる水位が形成されていることを踏まえ、2 号機でも津波により海水がトラスルームに進入したことを模擬し、S/C からの除熱に寄与したとの評価を実施したところ、実機の DW 圧力の挙動を再現できた。

14 日 13 時頃には原子炉水位が低下したため、RCIC による注水が停止したと判断しており、自動車のバッテリーを用いて SRV により減圧し、消防車による注水を開始したが、注水が十分ではなく、炉心が損傷した。

炉心損傷以降、炉心部分での水—金属反応による水素が発生し、DW 圧力が上昇しているが、14 日 21 時過ぎに S/C ベント小弁の操作を実施したところ、正門付近の線量が一時的に上昇した。ただし、この操作でラプチャーディスクが開放したか否かは不明である。

15 日 6 時過ぎに、衝撃音が確認され、同時期に 2 号機の S/C の圧力が絶対圧でゼロ（真空）を示したことで、2 号機の S/C が大きく破損した可能性が指摘されていた。しかしながら、地震計の記録から、同時時間帯の衝撃音は 4 号機の原子炉建屋爆発起因であることがわかり、また、2 号機の DW 圧力は 15 日 7 時 20 分に 730kPa[abs]を指示していたこと、14 日夕刻から DW-S/C の圧力に、物理的には考えにくい乖離が見られていたことから、S/C の圧力計の指示が不良である可能性が高いと見ている。15 日 7 時以降、特段の操作はないものの、DW 圧力が大幅に低下し、正門付近の線量が大きく上昇したことから、この段階以降で大量の FP の放出があったものと推定している。

なお、1,3 号機と異なり、2 号機で水素爆発は発生していないが、これは、原子炉建屋オペレーティングフロアのブローアウトパネルが 1 号機の爆発の影響で開放していたことで、原子炉建屋に漏洩してきた水素が換気されたことによるものと考えられる。

3. 3 3 号機

地震の揺れにより、原子炉は緊急停止し、他号機と同様に原子炉が隔離された状態となった。運転員は手順に従い RCIC を手動起動することで原子炉水位を確保し、原子炉圧力は SRV の自動開閉により安定的に維持されていた。

津波により全交流電源が喪失したが、直流電源が残存していたことから、プラントパラメータを監視しながら RCIC、高圧注水系(HPCI)により原子炉水位を維持した。RCIC 停止後、HPCI が水位低(L2)で自動起動して以降、原子炉圧力が約 1MPa 程度に低下していたが、これは、原子炉水位を安定的に維持するため、運転員が HPCI の運転を止めないよう操作したため、HPCI タービンへの駆動用蒸気が継続的に供給されたことで生じたものである。

13 日 3 時頃、HPCI の停止に伴い、原子炉水位が低下したため、2 号機と同様、SRV により減圧し、消防車による注水を開始したが、注水が十分ではなく、炉心が損傷した。

DW 圧力が最高使用圧力を超えたため、PCV の損傷を回避すべく S/C ベントを複数回実施した。この間は DW 圧力の上昇を繰り返していることから、格納容器の損傷はないか、限定的であったと考えられる。

なお、1 回目のベント時には、直接線等により正門付近のモニタリング値が一時的に上昇したものの、2 回目以降のベント時にはモニタリング値の有意な上昇はみられず、また、放出された FP の拡散経路

上では、周辺と比べて相対的に線量が高くなっている部分は見あたらない。

1号機での爆発を受け、3号機での爆発を回避するため、高い放射線環境や火花発生回避など、厳しい作業環境のもとにブローアウトパネルの開放などの準備を進めていたが、14日11時過ぎに原子炉建屋が爆発した。1号機と同様、炉心損傷にともなう水-金属反応で生じた水素が原子炉建屋に漏洩し、これが爆発したものと推定した。水素が漏洩する経路も1号機と同様と考えており、SGTS チャコールフィルターの線量調査の結果からも、線量が比較的小さいことから、逆流の影響は小さかったものと考えている。

3. 4 4号機

4号機は定検停止中であり、全燃料がSFPにある状態で、津波により直流電源を含む全電源が喪失し、プール水温が上昇していった。他のSFPに比べて相対的に崩壊熱が大きく、当初、プール水位の低下により3月下旬には燃料が露出していくことが懸念される中、3月15日6時過ぎに建屋が爆発した。懸念された水位に関しては、3月16日にヘリコプターで上空から目視したところ、水面が確認でき、燃料が露出していないことがわかった。後日の調査で、プールゲートが開き、原子炉ウェル（当時満水）から水が流入したことで、燃料の冷却に寄与し得る水量が増加したと評価した。その結果、水位低下の進行は緩やかになったと考えられる。3月20日以降、SFPへの放水、さらには注水を開始したことで、SFPの水位を維持することができた。また、4月以降、複数回のSFP水サンプリングを実施しており、いずれの結果からも燃料の大幅な損傷を示すデータは認められていない。

4号機の炉心には燃料が無く、上述のようにSFPでも燃料が過熱するようなことはなかったものの、水素爆発が発生した。この水素は、SGTS チャコールフィルターの線量調査の結果から、フィルタートレインの出口側の線量が高いことから、3号機バント流が流入したと推定した。また、原子炉建屋内の爆発状況の調査結果から、5階床面が上方に向かって変形していることや4階のダクトが散り散りになっていたこと等から、4階のダクトが爆発源になっていたと推定している。

4. 放射性物質の大気放出量評価

福島第一原子力発電所の1～3号機で炉心損傷が発生し、大量の放射性物質が放出された。この放出量は、プラント内外に多数設置している放射線モニタが機能していれば、直接的に精度良く評価することが出来るが、全電源を喪失したプラント内の設備だけでなく、敷地外周に設置しているモニタリングポストの機能も喪失したため、限られたモニタリングデータからその量を推定した。

その結果、総放出量は、希ガスで約500PBq、ヨウ素131で約500PBq、セシウム137で約10PBq、セシウム134で約10PBqと評価した。これはチェルノブイリ原子力発電所事故で放出された数値（希ガスで約6500PBq等）より小さいが、それでもなお、大量の放出であったことがわかる。

3月15日7時過ぎから2号機のDW圧力が低下し、ブローアウトパネルから大量の白煙が観測されたこと、当時の風向きや降雨の状況から、北西方向で大きな汚染を生じうる状況であったことから、この2号機からの放射性物質の放出の寄与が最も大きかったものと考えている。

また、格納容器バント時には、希ガスは放出されたものの、ヨウ素やセシウムの放出は相対的に小さかったものと推定している。

以上