

大阪府市エネルギー戦略会議が提案する 将来のわが国にとって容認し得る原子力発電技術の原則(案)

危険の根源

崩壊熱と放射能毒性は、核分裂エネルギーを利用する原子力の分離できないネガティブな特徴である。核分裂生成物の放射性を非放射性にする核種変換技術(Transmutation)についても、限定的応用についての理論はあるが現時点においては研究・実験段階であり、将来的にも多核種混在している使用済燃料に対しては現実的な適用の見通しが無い。

尚、核爆発に限っては、適切な燃料設計によって、原子炉が原子爆弾のような爆発(高速中性子だけによる即発臨界)をすることを、確率的にではなく原理的に防止出来る(確率ゼロ)ことから、そのようなリスクは排除出来る。

- 崩壊熱: 核分裂生成物による崩壊熱の発生を止める手段はない。崩壊熱の源は放射線。発熱と放熱がバランスした時の温度が接触する物質の融点よりも高い限り、メルトダウン、メルトスルーが続き、「閉じ込め」が出来ない。逆ならば「閉じ込め」可能。使用済燃料1トンからの発熱は10年後も2,000ワット、1,000年後でも100ワット。
- 放射能毒性: 1年が過ぎた使用済燃料1トンに含まれる放射性物質(110,000テラベクレル)を飲用可能濃度に希釈するには、琵琶湖の貯水量(275億立方メートル)の36倍の水が必要。崩壊熱による自己崩壊が起こらなくても外力によって「閉じ込め」が破壊されて拡散した場合の影響は甚大。代表的軽水炉の使用済燃料の放射能毒性が、原料であるウラン鉱石のそれと同等なレベルに低下するまでには約150,000年かかる。

絶対安全

下例のように、崩壊熱発散の阻害、「閉じ込め」機能の破壊などを可能とする大規模な自然現象、計画的な人的工作が想定し得る。その意味で、「絶対安全」は現実的に達成不可能である。但し、そのような超巨大な自然現象や極特殊な人的工作を除外するならば、経済的な成立性は別としても、絶対的に安全な原子炉の設計は、技術的には対応出来る可能性があり、以下そのような特性を「準絶対安全」と呼ぶものとする。

- 噴火: 高温の火砕流や爆発による飛翔物の直撃。大量の高温の火山灰の降積による埋没。炭化水素系の燃料、絶縁油、潤滑油、塗装、ケーブル被覆材は燃え、水は全て蒸発。但し、発生場所と時期がランダムではなく予兆もあるため、事前対応が可能。
- 隕石: 巨大隕石の場合、直撃だけでなく、付近の陸地に落下した場合の強力な震動、海に落下した場合の巨大津波の来襲も有り得る。予知可能。特定の原子力施設に対してではなく地球規模での全てのインフラに対する脅威。
- 巧妙な破壊工作: 安全を確保するための機能(フェイル・セーフやパッシブ・デザインに対してでさえも)をオーバーライドさせるか破壊し不能化することが出来る。
- 爆撃: 地上の設備である限り、爆撃やミサイル攻撃にも耐えることは不可能。

検討用ドラフト

2012年6月26日

佐藤 暁

1. 原子炉に対する技術的要件

1.1 オプション1 - 準絶対安全型原子炉

1.1.1 目的

- 以下の想定事象において、燃料破損とそれに伴うメルトダウンが起こり得ない原子炉であること。即ち、CDF(炉心損傷頻度)=0/(炉年)、LERF(早期大量放射能放出頻度)=0/(炉年)である原子炉であること。

1.1.2 想定事象

- 動的機器は全て故障し、人的対応は全て失敗するものと想定。
- 超巨大な自然現象と極特殊な人的行為を除く全ての外的要因について想定。地震、津波、地滑り、強風(台風、竜巻)、落雷、山火事などの自然現象、民間航空機を使った自爆テロとそれに伴う大規模火災、専門の戦闘訓練を受け最新兵器で武装したテロリスト集団による襲撃などの人的行為を含む。
- バックアップを含む全ての外部電源、所内非常用電源、直流電源の瞬間的な同時喪失を想定し、その後の復旧を期待しない。
- 事象発生後、一切の人的介入が不能になるものと想定。

1.1.3 設計条件

- 上記目的に適合するため、従来の安全設備に加え、「最終安全設備」を具備すること。
 - 最終安全設備は、従来の原子炉保護系、工学的安全設備の自動起動設定値よりも更に過酷な状態が一定時間以上持続した時点で自動的に起動すること。但し、この場合の時間計測と起動の原理は、以下のフェイル・セーフのパッシブ・デザインでなければならない。
 - 最終安全設備は、安全系として扱われ、多重性、多様性、独立性を考慮して2系統以上設置し、保安規定に基づく管理と供用期間中検査の対象とする。
- 「最終安全設備」の駆動力としては一切の動力を必要とせず、フェイル・セーフのパッシブ・デザインのみを担保とする。
 - 担保可: 重力による落下、スプリングによる反発、融点到達による溶融、磁力喪失による分離、アキュムレータによる圧力など。
 - 担保不可: バッテリーからの電気、火薬の爆発など。
- 「最終安全設備」には動的機器を含まず、静的機器にあっても、耐熱、耐食、耐震、耐放射線の性能が確認されたもののみを担保とする。
 - 担保可: 免震設計された構造物、配管、耐火ケーブルなど。
 - 担保不可: 全ての有機化合物(電気ケーブルの絶縁材、パッキンなど)。

検討用ドラフト

2012年6月26日

佐藤 暁

1.1.4 技術の検証

- 最終安全設備が作動することにより、燃料破損とそれに伴うメルトダウンが発生しないことが、理論的、実験的に十分な尤度を以って裏付けられていること。

1.1.5 現状

破損しない安全な核燃料の研究は従来から続けられているが、福島第一原子力発電所の事故をきっかけに、その必要性がより強く求められるようになってきている。二酸化ウランに替えて窒化ウランを用いる(熱伝導度の改善)、ジルカロイ(金属)の被覆材に替えて炭化ケイ素(セラミック)を用いる(熱伝導度、強度、中性子吸収断面積、化学的安定性)、中実ペレットに替えて中空ペレットを用いる(中心温度の低減)などの研究も進められている。

例えば燃料被覆管にジルカロイが使用されていなければ、福島第一原子力発電所においても水素爆発が起こることはなかった。

1.1.6 緊急対応と損害賠償制度

- 通常運転に必要なモニタリング設備のみを設置する。
- 緊急対応設備と損害賠償制度は対象外。

1.2 オプション2 - リスク制限型原子炉

1.2.1 目的

- 妊婦や小児を含む周辺住民が、被曝を唯一のリスクとして避難しなくてもよいこと。
- 設備の運転員が事象発生直後に当該設備から退避(原子炉事故からではなく、自然災害やテロ攻撃からの退避)した場合、又は、操作出来なくなった場合であっても、原子炉事故が自然に収束すること。
- 格納容器の損傷と劣化が起こり得ないこと。即ち、LERF(早期大量放射能放出頻度)=0/(炉年)であること。

1.2.2 想定事象

- 準絶対安全型原子炉に対する想定事象に同じ。

1.2.3 設計条件

- 準絶対安全型原子炉に対する設計条件に同じ。但し、ここでの設計の目的に関しては、上記目的とすること。
- 最終安全設備の機能によって、原子炉事故の進展が以下の状況を超えない規模で収束出来ること。
 - 格納容器を破壊に導く大量の可燃性ガスの発生がないこと。

検討用ドラフト

2012年6月26日

佐藤 暁

- 炉心溶融の進展があった場合でも、格納容器のメルトスルーが防止出来、且つ、気密性が低下しないこと。
- 格納容器は二重構造(内側を一次格納容器、外側を二次格納容器と呼ぶ。)で構成されること。
 - 一次格納容器を保護のために作動するフィルター付きベントは、最悪の事故において放出される放射性物質の量に対し、原子炉停止時における内蔵量を基準として、放射性ヨウ素と放射性セシウムに対しては 10,000 分の 1 未満、放射性希ガスに対しては 100 分の 1 未満とする機能を有すること。
 - 一次格納容器は、ベント作動時の圧力を設計圧力とし、解析的に保証された耐久圧力が、設計圧力の 3 倍以上であること。
 - 一次格納容器の設計圧力における漏洩率は、0.5%/日以下であること。
 - 二次格納容器は、航空機の墜落の衝撃に耐え貫通しないこと。一次格納容器、及び、その内部に設置された機器は、墜落した航空機の燃料の燃焼によって機能が劣化しないよう、一次格納容器の外表面が耐火材によって保護されていること。耐火材による保護に代え、自動的に作動するパッシブ・デザインの消火設備でも良い。
 - 二次格納容器には、その内部を負圧に維持し、一次格納容器から漏洩する放射性物質を吸着するフィルター(フィルター付きベントとして供されるフィルターと共用でもよい。)を介して外部環境に排出する装置が具備されること。当該の装置にはパッシブ・デザインが適用出来ないため、最悪の事故に対する評価においては、これを担保としてはならない。
- 施設内部からの汚染水が施設外部に漏洩することによって海洋汚染、地下水汚染を発生させることがなく、且つ、施設外部から施設内部への浸水によって大量の汚染水を発生させない構造であること。
 - 原子炉建屋の最下階の床面、及び内壁面には、配管、ケーブル、ダクトなどの貫通部を設けず、全てを鋼板、又はゴムライニングによって内張りする。
 - 原子炉建屋の基盤(ベースマット)が海面以下、又は、地下水面以下である場合には、原子炉建屋の最下階の床面、又は、壁面に亀裂があったとしても浸水しないよう遮水処理を施す。
 - 原子炉建屋の基盤(ベースマット)が海面以下であり、且つ、地下水面以下である場合には、予め水理地質学的調査を入念に行い、原子炉建屋の最下階の床面、又は、壁面に亀裂があった場合に浸水する水質が、海水となるのか淡水となるのか判定しておく。原子炉建屋の最下階には、このような浸水を受けるための専用サンプ・ピットを設け、浸水する水質に応じ、放射性物質の濃度を排水基準未満の濃度に処理した上で、連続的、又は、間歇的に運転出来る装置を浸水の恐れのない上階に設けること。
- 予め放射性廃棄物、特に混合汚染物(危険性のある化学物質と放射性物質が混合した

検討用ドラフト

2012年6月26日

佐藤 暁

汚染物)の発生量低減を考慮すること。

- コンクリートの表面はエポキシ塗装を施し、運転中に発見された亀裂部、剥離部に対しては定期的に補修を行う。
- 水銀汚染防止： 水銀灯、蛍光灯を使用せず、LED照明などを使用する。
- 鉛汚染防止： 鉛を遮蔽材として用いる場合には被覆して用いる。
- 最悪の原子炉事故に対する現実的な廃炉計画が存在すること。
 - 廃炉は、主要範囲について、事故発生後 20 年以内に完遂出来ること。土壌改質、緑地化は主要範囲に含める必要がない。
 - 廃炉によって発生する放射性廃棄物(クリアランス・レベルを超える廃棄物のみ)は、全て施設の敷地内で処理出来ること。破損した使用済燃料、及び、それが混在した熔融炉心夾雑物(コリウム)の固化物に対しても中間貯蔵を行うこと。
 - 敷地外の汚染地域からの放射性廃棄物(クリアランス・レベルを超える廃棄物のみ)は、全て施設の敷地内で処理出来ること。そのために必要な焼却炉などの減容設備、固化装置、保管設備などに対しては、実際に設置するまでは要しないが、用地の設定、詳細設計、建設工程、建設費用見積までを完了させておくこと。
- 廃炉が終了した敷地に対しては、空き地として放置されることなく適切な再利用計画があること。かかる計画は、最悪の原子炉事故が発生した場合であっても実行可能であること。

1.2.4 敷地外の汚染地域の復旧計画

- 放射性物質による汚染が敷地外に拡大する最悪の事態について、放射性ヨウ素と放射性セシウムの量が原子炉停止時における内蔵量の 1,000 分の 1 であると仮定し、予めそのための復旧計画を策定する。
- 復旧対象範囲は、実測に基づき、放射線レベル(1mSv/年：ICRP の定める公衆に対する許容値)、表面汚染密度(4Bq/cm²：ベータ線核種に対する管理区域からの搬出基準)、飲料水基準(10Bq/L：WHO 飲料水水質ガイドライン)、クリアランス・レベル(Cs-137 に対し 100Bq/g：平成 17 年 11 月 22 日経済産業省令第 112 号)を基準として適用する。
- 復旧方法は、優先順位に従って、汚染物の撤去、除染、希釈によるものとする。
- 撤去された汚染物、除染に要した機器、放射性物質を吸収した媒体は、全て原因となった原子炉事故の施設が属する敷地内に回収し、必要な減容処理、貯蔵を行う。
- 復旧不可能な範囲に対しては、損害賠償制度を適用する。

1.2.5 技術の検証

- 最終安全設備が作動することにより、格納容器の損傷と劣化が発生しないことが、理論的、実験的に十分な尤度を以って裏付けられていること。

検討用ドラフト

2012年6月26日

佐藤 暁

1.2.6 現状の技術

- パッシブ・デザインのコリウム冷却設備及び、フィルター付きベントはそれぞれ考案されており、それらの設計をそれぞれ入念に検証、進化させ、統合することにより、LERF = 0の設計が達成出来る可能性がある。

1.2.7 緊急対応と損害賠償制度

- 通常運転に必要なモニタリング設備に加え、緊急対応設備と損害賠償制度を適用。
- 緊急対応計画は、格納容器の保護のために作動するベントの結果放出される放射性ヨウ素と放射性セシウムの量が原子炉停止時における内蔵量の1,000の1、放射性希ガスの量が原子炉停止時における内蔵量の10の1であると仮定して策定すること。
- 損害賠償計画は、上記の放出量による放射能汚染の分布が最悪となるシミュレーション結果に基づいて策定すること。

2. 使用済燃料の貯蔵施設に対する技術的要件

2.1 使用済燃料の特徴と位置付け

2.1.1 有害な廃棄物としての視点から

- 代表的な軽水炉から発生する使用済燃料の放射能毒性が天然化するまでには、著しい長期間(約 150,000 年)を要する。
- そのような長期間の耐久性が保証された人工構造物は存在しない。
- そのような長期間の耐久性が保証された金属容器も存在しない。
- 燃料被覆管のジルカロイには、供用中の変化として水素化ジルコニウムが析出し、元々周方向に成長していた析出物が熱サイクルによって径方向に向きを変化させることで、燃料被覆管の機械的強度が、フープ応力に対して著しく劣化する特徴が知られている。現在のところ、このようなメカニズムによる燃料被覆管の劣化が熱サイクルの有無に拘らず、経時的に進行しないとはいえ切れず、そのような長期間のうちには破損が生じるものと想定しなければならない。
- よって、使用済燃料の貯蔵は、そのような破損が起こり出す前の有限期間に限定しなければならず、その先、再処理を行うのか最終処理を行うのかを決定しなければならない。それが定まらない限り、或いは、その実現の具体的用途が立たない限り、無制限にその貯蔵量を増やし続けていくことは適切ではなく、少なくともそれまでの間は、暫定的上限値の設定も考慮されるべきである。

2.1.2 リサイクル・エネルギーの資源となり得る可能性から

- 同時に使用済燃料は、プルトニウムやアメリシウムなどのアクチノイド元素を含んでおり、潜在的なりサイクル資源でもある。数百年後には、実質的に全ての化石燃料が枯渇する可能性もあり、その前に主要なエネルギー資源の一つに浮上する可能性も排除は出来ない。従って、その選択について、採用するか放棄するか最終的に判定されるまでの期間は、廃棄よりも貯蔵の方が好ましい。
- アクチノイド元素は、使用済燃料の放射能毒性の天然化を著しく長期化させている原因核種であり、これが燃焼されることにより、再処理後の残渣(高レベル放射性廃棄物)の処理を容易化することが期待される。即ち、その場合の放射能毒性の天然化は、数百年オーダーにまで短縮され、地層処理ではなく人工設備による対応が可能になる。
- 但し、このようなリサイクル利用の見通しに関しては、現時点での知見では、乾式再処理と高速炉の導入が必要になり、新たな原子カインフラの構築が必要となる。近い将来において一気に新たなエネルギー源の主力へと成長する可能性はなく、まずは研究と実証の蓄積による技術の成熟を見届ける必要がある。
- わが国の再処理施設(六ヶ所)と高速炉(もんじゅ)は、このようなリサイクル利用を支援

検討用ドラフト

2012年6月26日

佐藤 暁

する技術ではなく、アクチノイド元素の処理を考慮していない。

2.1.3 責任貯蔵について

- 使用済燃料のリサイクル利用の選択が放棄され、廃棄物として処理される場合、その最終処理法として地下数百メートルの不透水層に地層処分するという案が国際的に標準化されつつあり、既に一部の国々での採用が始まっている。しかしその場合、地下構造の安定性が裏付けられるべき期間が余りにも長く、わが国においてそのような用地が将来確保されるかどうかは定かでない。
- 使用済燃料は、その内包する放射性物質の量が膨大であること、又、現状、その保管状態が圧力容器や格納容器のような強固な障壁によって保護されていないことから、潜在的なテロリストや戦争における敵国（以下、「潜在的なテロリストら」と略）にとっての魅力的な標的となり得る。この場合の標的とは、核爆弾を製造するための原料としての盗取ではなく、その貯蔵施設に対して大規模な破壊を加え、大量の放射性物質を拡散させるという戦略に沿った標的という意味である。
- 一方では、莫大な規模のエネルギー資源としての潜在的な用途もある。
- 以上の両面の特徴を鑑み、使用済燃料の貯蔵は、国として責任を以ってこれに当たるべきである。しかしこのことは、必ずしも使用済燃料の発生の直後から国が引き取ってそのような管理下に置くべきであるという意味ではない。発生元である原子炉が廃炉になるまでの期間は各原子力発電所内において貯蔵、管理し、廃炉の工程が全て終了してから専用の集中施設に移動して貯蔵、管理を行うという選択も有り得る。

2.2 貯蔵施設の目的

- 使用済燃料の貯蔵期間中、及び、その後の移動中において、放射性物質を外部環境に対して放出させないこと。

2.3 設計条件

- 準絶対安全としての想定事象に耐え得ること。
- 潜在的なテロリストらにとっての魅力的な標的とならないこと。
- 湿式貯蔵は、原子力発電所に付属する使用済燃料プールとしてのみ使用出来るものとし、集中施設に対しては乾式貯蔵を適用するものとする。

2.3.1 乾式貯蔵

- 空気の自然対流によって冷却されるパッシブ・デザインであること。
- 収納キャスクは免震パッドに固定する。

2.3.2 湿式貯蔵

検討用ドラフト

2012年6月26日

佐藤 暁

- プール水の冷却と浄化用にアクティブ・デザインの装置を使用してもよい。
- プールが破損した場合の使用済燃料の冠水用、及び、冠水が不可能な規模の破損が起こった場合の散水用として、駆動力として電源に拠らない補給水系を設置すること。
- 冠水も散水も出来ない場合であっても、空気自然対流による冷却によって崩壊熱が除去され、ジルコニウム火災のような燃料被覆管を損傷させる事象が発生しないこと。

2.4 現状の技術

- 乾式貯蔵技術は完成している。免震パッドを採用している例はないが、困難な課題であるとは思われない。