

原子力プラントにおける安全機能の構造と定義

Structure and Definiton of Safety Function in Nuclear Power Plant

丹羽 雄二 (Yuji Niwa)* 鷲尾 隆 (Takashi Washio)†

要約 この報告では、原子力プラントの事故収束において重要な概念である安全機能について議論する。原因の同定出来ない事故が起こった場合、運転員は、プラントの安全機能を修復し、安定化を図れば、プラントの安全が維持されることになっている。事故の収束操作に、事象（原因）を同定することを必要としないので、従来の概念とは異なる画期的な概念である。しかしながら、安全機能は、主に工学的判断から決定されており、その定義や構造が明確ではない。そこで、安全機能を定義、構造を明確にし、安全分野における、更なる適用を可能にする。本報告では、十分に構造化され、定義された安全機能を特に安全機能規定因子と呼ぶ。

キーワード 原子力発電プラント、安全機能、安全機能規定因子

Abstract In this report, safety function that is a significant concept in recovery from an accident of Nuclear Power Plant (NPP) is discussed. When an accident whose cause cannot be diagnosed occurs in NPP, operators have only to restore and stabilize safety functions to maintain NPP in safety condition. Since event identification is not required, this concept is quite unique. However, safety functions have been considered based mainly on engineering judgments and no clear definition and structure have not been considered. Therefore, definition and structure of safety functions are strictly made in this report. These will allow us the extensive application to nuclear safety field. Especially, Safety Function Designator is introduced to call well-defined and structured safety functions.

Keywords nuclear power plant, safety function, safety function designator

1 事故修復における安全機能

原子力発電所で事故が起こった場合には、通常、指示計、警報といったプラント計装からプラントパラメータの絶対値、動きを評価し、運転員が事故（原因）を同定する。事象が同定されれば、当該事象の事故時手順書を引用する。これを参照し、事故の収束にあたるのが、最も一般的で伝統的な事故時対応操作である。しかしながら、TMI 2号機の事故の経験から、多重の安全系故障、Human Errorが重畳した場合には、しばしば運転員は事故の原因を同定することが困難になり、事象同定に基づく事故時手順書が必ずしも、全ての事象に対して有効でないことが明らかになった。この経験を基に現在、世界各国で従来の事象ベースの手順書体系に加えて、制定され運用に入っているのが、安全機能（兆候）

ベースの事故時手順書と呼ばれるものである。安全機能ベース手順書により、運転員は事象を同定することなく、プラントを破局的な事態から防ぐことが可能とされている。この手順書体系では、予め定められた安全機能が阻害された場合は、プラントが危険な状況にあるので、阻害された機能を速やかに回復し、維持しなければ、プラントが致命的な事態に陥るという考えをとっている。従って、運転員はこれらの安全機能維持に気を配れば良いわけで、必ずしも事象の同定を行う必要はない。

さて、この安全機能の定義について検討してみよう。そもそも安全機能については、最初に提唱したのは、米国コンバスチョン・エンジニアリング社（CE社）のWilliam Corcoranら⁽¹⁾である。彼らは、安全機能を決定するに至った考察経緯を下記のよう

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

† (株)三菱総合研究所 総合安全研究センタ

(Present Address 大阪大学 産業科学研究所))

に述べている。

- (1) 10 CFR 50 (ref. 5), Appendixに初めて「安全機能」という言葉が定義なしで設計の基準として使用されていることが1971年までのトレースバックで明らかになった。
- (2) WASH-1250(1973年)に安全のための3つのレベルの機能が議論されていることを文献トレースバックにて発見した。同年, EDS Nuclear, Inc. と Boston Edison Company により「安全機能と安全防護シーケンス解析(事象シーケンス解析)」という概念が, 設計解析の検証ツールに導入された。ここで謳われた19の安全機能が最終的に10の Corcoran らの提唱する安全機能の基になった。
- (3) IAEAが設計時に要求される20の必要な安全機能のリストを1979年に発行した。Corcoran の提唱する10の安全機能の包絡性を確認した。

このように, Corcoran らは, 新しい概念を構築したというよりは, 既存の設計で用いられていた概念を整理し, これらの安全機能を回復するための手順を考察したという方が妥当であろう。Corcoran らは, 安全機能を運転員の事故時の役割から「炉心損傷を防止し, 放射性物質の環境への放出を可能な限り低減する1つかそれ以上の Action の集合」と定義した。この場合, Action とは, 能動的な安全系の機器作動, 受動的なプラントの挙動(自然循環等)および運転員の操作をいう⁽²⁾。従って, 「安全機能」は十分な検討, 検証のもとに規定されたものではなく, 従来からあった言わば, 設計者の安全に対する認識を体系化したものである。

一方, 人工知能の分野でも「機能」の定義は行われている。あるシステムやその部分の行動が方向付けられている結果を Goal と定義するが, 「機能(Function)」はあるシステムの構造や行動に基づいて, それの一つ或いは複数の Goal の達成においてどのような役割をしているかを記述するものとして定義される⁽³⁾。

以上のことから, 「安全機能」というものは, 客観的なものというよりは, 設計者がそれぞれの主観に応じて決定するものであるということが出来る。主観が入っている限り, 必ずしも普遍的な真実であるということは結論することができない。従って,

「安全機能」は, それが損なわれた場合は, プラントが安全でない恐れがあるということは大多数の同意を得ることができるかも知れないが,

「プラントが安全な状況にある」if and only if 「全ての安全機能が成立」

ということは, 検討の価値がある。何よりも, 「機能」という多分に客観的な概念には, 設計者の工学的判断が入っており, より客観的な物理則に基づいた検証が必要である。物理法則を一般的に定式化することにより, 現行の「安全機能」よりも, より客観性のある結論を導くことができる。

「安全機能」に対して更に指摘すべき問題は, Corcoran らが提唱する「安全機能」の構造である⁽²⁾。「安全機能」の構造については, 炉心損傷に係わる安全機能の構造の例を挙げ図1のような階層構造をとっている。即ち, 上位の安全機能維持のため

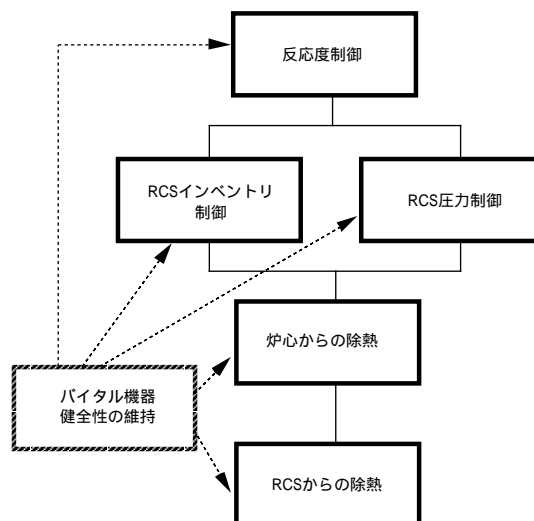


図1 安全機能の階層構造 (Corcoran, 1981)

には, 下位の安全機能を維持することが必要であり, 上位の機能維持を優先させるべきであると結論付けている。しかしながら, このような階層構造の機能を導入することは, 運転員に負担をかける可能性がある。構造を理解し, 常に優先度を念頭に入れていなければならないということは, 複数の機能が障害された場合に下位の機能維持の操作を実施し, 結果的に破局的な事象に至る可能性も捨てきれない。

Corcoran らの安全機能の実体は, 前述の定義を

さらに Component 又は State レベルに落した形で、プラントパラメータ、その導関数、および機器の Availability の Subset であると考えてよい。ウェスティチングハウス社（W社）はCE社の基本概念を更に検討を重ねた形で異種共存手順書体系を整備したが、安全機能については同様なものである。安全機能を構成するプラントパラメータに更に可計測性の良いものを選択している点が特徴である。プラントパラメータの Subset という観点から各安全機能を評価した場合、各安全機能間でパラメータの共用があったり、関連性の強いパラメータの使用が認められる。このことから、ある機能の障害が起これば、当該機能の回復操作を実施した場合、他のある機能に影響を及ぼし、これが障害されるというような悪循環発生危険性が指摘される。

これらを勘案した場合、各安全機能の構造は、図2のように独立、並列的なものが望ましいといえる。

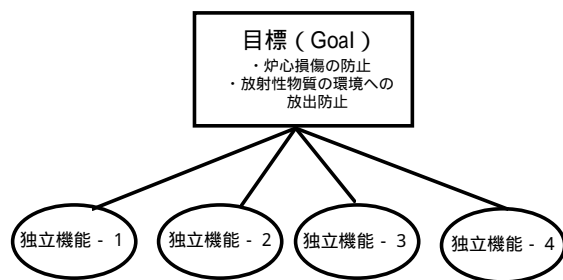


図2 安全機能の望ましい構造

Corcoran らは、安全機能を人間の生存に必要な機能、例えば、血圧、脈、呼吸等になぞらえている。人間の死亡防止という Goal を設定した場合、これらの機能にも関連が認められるものの、対症療法の実施しやすさという観点からは独立、並列的な構造をとっていると考えられる。原子力プラントの場合は、各機能の回復操作は複雑であり、ステップ数の多いタスクになる。それ故、各安全機能間の構造、依存性については、十分な検討が必要である。

一般に原子力プラントのパラメータ構造は、ある変数の依存性（Causality）を調べていった場合、Cyclic になることは、よく知られた事実である。即ち、原子力プラントを記述するパラメータ構造は、ブランチ型を形成せず、ネットワーク型を形成して

いる。仮に安全機能をパラメータの集合と考えるならば、独立な機能を設定することは、極めて困難なことが判る。必然的に何らかの依存性が如何なるパラメータ集合を考えようと生ずるであろう。しかし、何らかの安全機能間の関係の記述を安全機能そのものに内包できれば、操作を決定する際に各機能間に依存性を予測することが可能になる。これ故、機能間の依存性を考慮した適切な操作戦略を決定することができる。

なお、今一つ、興味深いアプローチの事故時手順書を採用している例もある。状態指向手順書（State Base Emergency Operating Procedure）と呼ばれるもので、フランスのAPE手順書がこれにあたる。原子炉水位、サブクール度の2つのパラメータを採用し、これらの張る平面を領域に分け、領域毎に操作を与えている。オリエンテーション図と呼ばれるもので図3にその概念を示した。しかし、本来

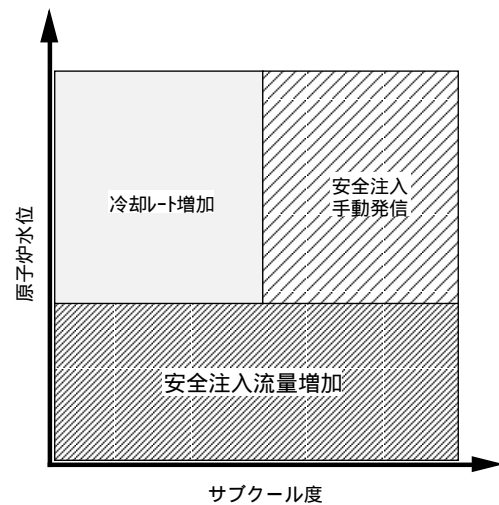


図3 フランスの事故手順書のオリエンテーション図

動的に変化し、かつ関数曲線で区分されるはずの操作領域が全て静的に矩形で記述される等、多分に工学的判断を交え、作成したものと思われる。

2. 安全機能規定因子の検討

2.1 安全機能規定因子の定義

現在の事故時手順書体系で使用されている「安全

機能」と本論で提案する概念を区別するために、安全機能規定因子という概念を定義する。これは、既に安全機能という概念が商用炉に適用され、広く世界に知られているからである。但し、その内容は、従来の安全機能と同じものであり、安全機能規定因子は、安全機能の定義をより明確にしたものと考えてよい。安全機能規定因子 (Safety Function Designator; SFD) については、下記の仮定をおく。

(1) 仮定

各安全機能規定因子はそれぞれ、プラント物理モデルの部分集合とそれに関する規定因子維持の可否判定可能な規範の組として表現可能である。

(2) 定義

この仮定に基づき、「安全機能規定因子」を下記のように定義する。

$$U = \{SFD_i \mid i = 1, 2, \dots, n\},$$

$$SFD_i \stackrel{\text{def}}{=} [A_i, P_i, R_i, C_i]$$

(1)

但し、

A_i : 安全機能規定因子 i のモデルの前提、仮定の集合

P_i : 安全機能規定因子 i のモデルパラメータ、変数の集合

R_i : 安全機能規定因子 i のモデルパラメータ、変数間の制約の集合

C_i : 安全機能規定因子 i の規定因子の可否判定を行う規範の集合

更に安全機能規定因子間の関係については、

$$d(SFD_i, SFD_j) \stackrel{\text{def}}{=} \text{安全機能規定因子 } SFD_i \text{ から } SFD_j \text{ へ向かう依存関係が存在する。}$$

(2)

という記号で表す。

$d(SFD_i, SFD_j)$ から成る集合を D とする。

$$D \stackrel{\text{def}}{=} \{d(SFD_i, SFD_j) \mid SFD_i, SFD_j \in U\}$$

(3)

従って、安全機能規定因子とそれらの相互関係は、全体として、 $\langle U, D \rangle$ というノード集合とエッジ集

合の2項で表現される。

安全機能規定因子の具体的内容決定においては、

- ・規定因子喪失がプラントに危険性を及ぼす状態になること。この場合、危険性を及ぼす状態とは、燃料被覆管温度が1200度を越えることをいう。
- ・定式化された安全機能規定因子の表現は、事故時手順構築に関して適用可能な内容とする。
- ・従来の安全機能との対応が可能なこと。

の3点を念頭におき、下記の5つの安全機能規定因子を対象とした。

- (1) 炉心除熱維持
- (2) 炉心反応度制御
- (3) RCS圧力制御
- (4) RCSインベントリ維持
- (5) RCS除熱維持

おのおのの安全機能規定因子間には依存性があるので、この依存性を考慮に入れた総合的な安全制御系を考える必要がある。この問題についても、後の安全機能規定因子の相互関係の節以降で問題解決を考察する。

2.2 炉心除熱維持の安全機能規定因子

(5-9)式の定義に従って、各安全機能規定因子を定義する。モデルの前提、仮定は箇条書きに書き下し、これをSFD(A)で表す。安全機能規定因子におけるモデルパラメータ、変数間の制約の集合SFD(R)は、パラメータ、変数の集合SFD(P)と結合した形で、物理方程式で表すことが出来る。従って、安全機能規定因子を記述する物理方程式は、SFD(P,R)と表す。炉心除熱は、系からの熱の放出を表し、炉心温度を決定する直接的な要因となるため、重要である。各々のモデルを表す図と安全機能規定因子を規定するパラメータをまとめたものを表1に示す。

2.2.1 安全機能規定因子「炉心除熱維持」における仮定： $SFD_1(A_1)$

$SFD_1(A_1)$ に関する事項は次に示すとおりである。

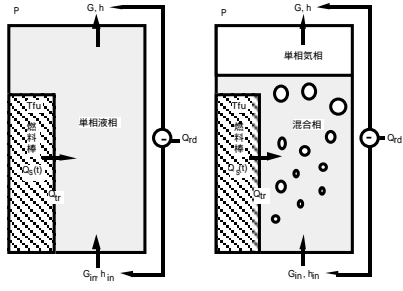
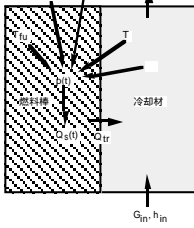
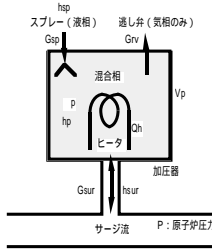
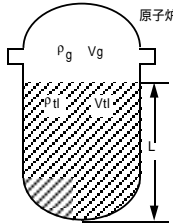
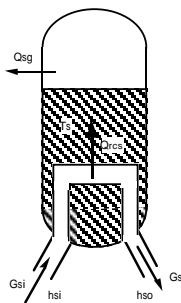
安全機能規定因子	モデル	安全機能規定因子を代表するパラメータ
炉心除熱維持		燃料温度 T_{fu}
炉心反応度制御		炉心反応度
RCS圧力制御		RCS圧力 P
RCSインベントリ制御		原子炉水位 L
RCS除熱維持		RCSからの除熱量 Q_{rcs}

表 1 各安全機能規定因子に関連するモデルの概要

基本的に集中定数系近似モデルで記述するので、この近似に関する仮定を記述し、その妥当性について考察する。

- (1) 燃料，冷却材液相部または混合部，伝熱部は一点近似とする。
- (2) 炉心入口冷却材は常に液相であるとする。
- (3) 炉心冷却材沸騰時の水位を，全気相が上層バルクを形成するとして定義する。
- (4) 炉心冷却材沸騰時のクオリティ，ボイド率は気液全混合として定義する。
- (5) 冷却材が2相状態では熱平衡を仮定し，所与の圧力下で飽和状態にあるとする。
- (6) 冷却材に対する運動量保存則は考えない。
- (7) 冷却材混合部の燃料棒と冷却材間の熱伝達係数はボイド率だけの関数とする。

仮定(1)はもし燃料棒が炉心沸騰時に上層気相バルクに露出しても，燃料棒から気相バルクへの熱伝達係数は小さいため無視可能であり妥当である。仮定(2)は，炉心(燃料棒)損傷回避の必要条件であり，これが満たされないような状態は安全機能規定因子が保たれる状態範囲としての考察対象から除外する。仮定(3),(4)は相矛盾するものであるが，沸騰時に全ての気相が上層バルクを形成するわけではないので，炉水位低下による燃料棒露出の可能性計算としては(3)は保守的仮定となる。また，燃料棒から炉心冷却材液混合部への熱伝達係数の設定としては，仮定(7)と共に(4)は保守的仮定である。仮定(5),(6)は急激な過渡では成立しない。実際には，定性的に全く異なる程の精度の低下は考えにくいので，妥当な仮定と考えられる。仮定(7)は混合部では熱伝達係数を決める支配的要因がボイド率なので妥当である。

2.2.2 安全機能規定因子「炉心除熱維持」における規範： $SFD_1(C_1)$

以下の条件のどれかに該当する場合には安全機能規定因子は成立しないと考える。安全機能規定因子が満たされない場合は，本論文で提案する知的安全制御系は無効となる。その意味で，本論文で提案することの限界を与える。

- (1) 燃料棒温度が14730K (1200)を超えた場合
- (2) 炉心水位が燃料棒上端部高さを下回った場合

規範(1)は燃料棒被覆管の材料の耐高温性の限界性能からの直接条件である。なお，ここでは手法構築を第一目的として，対象問題が複雑になることを避ける。炉心燃料棒損傷の可能性原因として燃料棒温度のみを考え，限界熱流速，限界熱流速比は除外する。

規範(2)は，燃料棒表面から気相への熱伝達係数は小さいため，燃料が冷却材気相部に露出すれば，直ちにその部分の燃料棒温度は1200 を超えることが見込まれるため，規範(1)と等価な条件である。規範(2)が満たされる場合には，露出部の燃料棒温度は他部の燃料棒温度と著しく異なるため，仮定(1)は妥当ではなくなるが，安全機能規定因子が保たれる状態範囲として計算対象となるのは規範(2)が生起する直前までであるため，仮定(1)を置くことは何ら問題ではない。

2.2.3 安全機能規定因子「炉心除熱維持」におけるパラメータの定式化： $SFD_1(P_L, R_1)$

状態を記述する物理方程式の数が多いことと，論旨の展開上，ここでは省いても差し支えないので，付録-1に示した。

2.3 炉心反応度制御

炉心反応度を制御することは，発熱を制御することであり，炉心損傷防止という目標を考えた場合，1つの重要な規定因子と考えられる。本論文では，臨界の場合は，1点炉動特性式で核分裂による熱出力を記述する。未臨界が達成された場合は崩壊熱の減衰式を適用する。

2.3.1 安全機能規定因子「炉心反応度制御」における仮定： $SFD_2(A_2)$

上述の基礎となる物理方程式を適用することから，仮定を次のように設定した。これらの妥当性について，次に記す。

- (1) 燃料，冷却材とも一点近似とする。

- (2) 反応度フィードバック効果は燃料棒温度，冷却材温度，冷却材密度，圧力とする．
- (3) 臨界時の炉心出力はプロンプトジャンプ近似の一点動特性に従うものとする．
- (4) 未臨界時の崩壊熱出力は所与の時間減衰曲線に従うものとする．

仮定(1)は，安全機能規定因子の構造を取り扱う上で，特に問題になるとは考えられない．仮定(2)は加圧水型原子炉の支配的な効果を全て考慮しており妥当である．仮定(3)は即発中性子の増加は，他のパラメータの動的挙動と比べて，極めて速いため，妥当な仮定と考えられる．また，炉内の中性子束分布を考慮しないことは，問題になるかも知れないが，適当な Peaking Factor (最大中性子束の大きさ / 平均中性子束の大きさ) を乗ずれば良いので，仮定としての正当性は失われない．仮定(4)は，通常の事故解析でも使用されるもので，妥当である．

2.3.2 安全機能規定因子「炉心反応度制御」における規範： $SFD_2(C_2)$

以下のに該当する場合には，炉心反応度に関する安全機能規定因子は成立しないと考える．

- (1) 運転時の場合には $1\$()$ 以上の反応度がステップ状に印加された場合
- (2) 停止時の場合には反応度が正になった場合

規範(1)は，1点炉動特性方程式において即発臨界が起こることを表し，即発臨界状態になった場合，自動制御系の動作を仮定しても，状態を制御出来ないので，安全機能規定因子の適用範囲から外す．ここでは，停止中の不具合は問題から除外するので，規範(2)を設ける．

2.3.3 安全機能規定因子「炉心反応度制御」におけるパラメータの定式化： $SFD_2(P_2, R_2)$

付録-2に炉心反応度の安全機能規定因子を規定する方程式を示す．

2.4 RCS 圧力制御

燃料を冷却する1次冷却材系統 (RCS; Reactor

Coolant System) の圧力の制御手段としては，加圧器が主たるものである．加圧器の圧力が一定以上に達すると，加圧器逃がし弁が開き，RCSの過度の圧力上昇を抑制する．従って，これも重要なRCS圧力制御手段である．

2.4.1 安全機能規定因子「RCS 圧力制御」における仮定： $SFD_3(A_3)$

主な仮定は，集中定数化に関するものであり，RCS圧力制御の安全機能規定因子に関する仮定は次のとおりである．

- (1) 加圧器圧力をRCS圧力とする．
- (2) 加圧器内は気液混合の1点近似とする．
- (3) 加圧器内は熱平衡および飽和状態にあるとする．
- (4) 冷却材に対する運動量保存則は考えない．
- (5) 加圧器サージ流は，加圧器内に流入する場合は炉心出口冷却材の相状態に従い，流出する場合は加圧器内の液相部が流出するものとする．
- (6) 加圧器逃し弁からは加圧器内の気相部のみが流出するものとする．

仮定(1),(2)は本論文の目的から，十分に妥当と考えられる．仮定(3)は，比較的ゆっくりした過渡状態を対象とすることと，全てが液相の加圧水になる以前までの状態が解析対象であることから妥当である．仮定(4)も同様である．仮定(5)は各条件下でのサージ流の内容に従って設定したものである．仮定(6)は比較的ゆっくりした過渡を対象とし，しかも満水に近くなる前の状態の解析が目的であることから妥当である．

2.4.2 安全機能規定因子「RCS 圧力制御」における規範： $SFD_3(C_3)$

以下のに該当する場合にはRCS圧力制御の安全機能規定因子は成立しないと考える．

- (1) 加圧器圧力が炉心冷却材温度の飽和圧力より低い．
(加圧器圧力が炉心冷却材温度の飽和圧力より一定圧力以上低い.)

規範(1)は，炉心の沸騰を防ぎ，除熱効果を維持

するための条件づくりのためである。一方、括弧内は圧力喪失により炉心が急激に発泡することに対応する。

2.4.3 安全機能規定因子「RCS 圧力制御」におけるパラメータの定式化： $SFD_3(P_3, R_3)$

RCS 圧力制御の安全機能規定因子を規定する物理方程式系を付録-3 に示す。

2.5 RCS インベントリ維持

RCS インベントリ維持については、原子炉水位が直接、測定可能なプラントを対象とする。それ故、本論文で RCS インベントリ維持という言葉は、原子炉水位の制御という言葉に置き換えても良い。

2.5.1 安全機能規定因子「RCS インベントリ維持」における仮定： $SFD_4(A_4)$

RCS インベントリ維持に関するモデリングの仮定は、次のとおりである。燃料が水没していることが基本条件になっていることに注意しよう。従来、RCS インベントリは、加圧器水位で代表させていたが、スリーマイル島 2 号機の事故の経験によれば、より直接的なパラメータを使用することが推奨されている。

- (1) 炉心燃料棒が冠水すれば、種々の冷却手段により炉心除熱機能を維持できる可能性があるものとする。
- (2) 炉心燃料棒が冠水とは、炉心冷却材水位が燃料棒最上部位置以上の場合である。

仮定(2)は仮定(1)に対して保守的である。実際にはそれだけの液相部量がなくとも、沸騰によるボイドの吹き上げで、燃料棒最上部も十分に濡れると考えられる。

2.5.2 安全機能規定因子「RCS インベントリ維持」における規範： $SFD_4(C_4)$

以下に該当する場合には RCS インベントリ維持の安全機能規定因子は成立しないと考える。これは、仮定の裏返しである。

- (1) 炉心燃料棒が冠水せず、上部が気相に露出し

ている。

この規範では、いかに巧みに冷却材量やその流量、温度を調節しようとしても、絶対的に必要な除熱は不可能である。

2.5.3 安全機能規定因子「RCS インベントリ維持」におけるパラメータの定式化： $SFD_4(P_4, R_4)$

RCS インベントリ維持の安全機能規定因子を規定する物理方程式系を付録-4 に示す。

2.6 RCS(からの)除熱確保

燃料からの除熱をすれば、RCS に伝えられる。この RCS に蓄えられた熱量をシステムの最終的なヒートシンクに捨てれば、燃料 - 1 次冷却材系 - ヒートシンクの熱移動のパスが成立する。従って、本安全機能規定因子は、炉心除熱、RCS 除熱と深く係わる。

2.6.1 安全機能規定因子「RCS 除熱確保」における仮定： $SFD_5(A_5)$

- (1) RCS 除熱は、低エンタルピ冷却材が外部から供給され、かつ冷却材が熱と共に RCS から流出するか、冷却材からの熱交換除熱によるのみ行われる。
- (2) 炉心出口冷却材が混合相または気相の場合は、蒸気発生器の除熱は行われない。

仮定(1)は RCS の除熱過程の基本を網羅している。それ以外の冷却材気化潜熱による熱エネルギーの吸収、減圧による断熱膨張などは含めない。これらは飽くまで一時的なものであり、最終的には仮定(!)に含まれる過程で系外に廃熱される必要がある。仮定(2)もこのような条件下では、1 次冷却材ポンプが使用できなくなることから、妥当である。

2.6.2 安全機能規定因子「RCS 除熱確保」における規範： $SFD_5(C_5)$

以下の条件に該当する場合には安全機能規定因子は成立しないと考える。

- (1) 炉心除熱量より RCS 除熱量が少ない。

この規範の条件では、炉心に熱が滞留し必要な除熱

は絶対的に不可能である。

2.6.3 安全機能規定因子「RCS除熱確保」におけるパラメータの定式化： $SFD_5(P_5, R_5)$

RCS除熱の制御の安全機能規定因子を規定する物理方程式系を付録-5に示す。

2.7 複数の安全機能規定因子間の関連の考察

各安全機能規定因子に関してこれまでに構築したモデルを基に、ヒューリスティックからの各規定因子への物理的入力量及び各規定因子の出力量を因果的順序付けを鷲尾の提唱する方法(4)により求めた。鷲尾の提唱するヒューリスティックは次のとおりである。

H1：変量群 dX/dt とその変量群の時間積分 X との関係を表す法則の中では、 X は dX/dt に一方的に依存する。

微分方程式のように内的発展型因果性を記述するものである。直感的に明白である。ある状態は、それまでの履歴から決定されるというのは、常識的な結論である。但し、いくつかの反例が挙げられている。

H2： $f(X, Y)=0$ で記述される変量群関係において、変量群 $X(t)$ と時間遅れ変量群 $Y(t+\tau)$ との関係を表す法則では、 $Y(t+\tau)$ は $X(t)$ に一方的に依存する。

パイプ内の流体の輸送遅れ等を記述する式に見られるものであり、我々の直感や、常識に外れるものではない。

H3：法則が表す対象の属性変量群と状態量群の間には、一方的依存関係が見られる。依存の向きは、我々の現象理解に一般的知見に基づき決められる。

Ohmの法則は好例であろう。抵抗の属性量である抵抗 R が有限であるという条件で、電圧 E と電流 I について考える。 R と I を変えて E を変化させたり、 R と E を変えて I を変化させることができても、 E と I によって R を変化させることは、常識的な理解では、不可能で

ある。

H4：2つの問題領域にまたがる関係を表す法則では、1つの問題領域に属する変量群が他の問題領域の変量群に一方的に依存する。依存の向きは、我々の現象理解の一般的知見に基づき決められる。

例えば、原子炉の熱発生を記述する式、 $Q=k \cdot f$ で、H4が適用できる。中性子束密度 f が決まれば発生熱量 Q が決まり、逆も同じである。原子力工学の領域では、 Q を規定するのは、 f と見なされる。

H5：同種変量のみを含む変量群内の収支に関する法則では、依存関係は全て双方向である。

例えば、保存則が成立する系で、系に流入する量を規定する変量と系から流出する量を規定する変量との関係は、常に双方向的である。

H6：ある法則において、変量群 X, Y 間の依存関係が明確でない時、変量群 X に関する我々の現象解釈において常に X を変化させる他の法則群が用いられるとする。この場合、法則においては、 X から Y への一方的依存関係を定める。

熱電導率 R を考え、ここに熱量 Q が dQ/dt 流れているとする。上流温度、下流温度の差を T とする。ヒューリスティック H3 より、 dQ/dt および T は、 R に一方的に依存すると考えられる。しかし、熱伝導の法則では、常に dQ/dt が、 T に一方的に依存すると解釈することが妥当である。これは、H3とは異なり、一般的に熱は圧縮性の量であるからである。

ここで、鷲尾によって導入された仮定構造方程式の概念を導入しよう。構造方程式とは、物理的因果性に関する情報を保存している方程式を言う⁽⁵⁾。この意味から、微分方程式は、構造方程式であるが、解析的に解かれた解は構造方程式ではない。一般に物理則を記述する構造方程式は、更に制約が強く、多くの仮定情報を含んでいるものと考えられる。従って、特にこれらを仮定構造方程式 (Assumptive Structural Equation) と呼ぶ。仮定構造方程式とは次のような性質をもつ方程式である。

ある方程式 I とそれに含まれる全ての変量の集合を考える。その方程式においてある変量群 X_i から

それ以外全ての変量の群 Y_l への一方的依存性が仮定されるとする。 Y_l は常に空でないとする。同種変量間の収支法則のように変量間に一方的依存性が認められない場合は、全ての変量を Y_l に組み入れ X_l を空集合とする。この時、方程式における変量間の関係を以下の形式に表す。

$$\text{if } X_l \neq \{ \} \text{ then } G_l(Y_l) = F_l(X_l)$$

$$\text{if } X_l = \{ \} \text{ then } G_l(Y_l) = 0$$

ただし

$$X_l \cap Y_l = \{ \}$$

Y_l, G_l は方程式 l のそれぞれ右辺、左辺を表す。

このように、一連の各安全機能規定因子を規定する方程式系を仮定構造方程式に書き下す。これらから、各安全機能規定因子に関する因果的順序づけを行うが、その手順は次のとおりである。

- (1) 安全機能規定因子モデル中の各物理法則式において、どの変数が因果的上流となり、それ以外が因果的下流となり得るかを一定のルールにより決定する。これに基づき各式を仮定

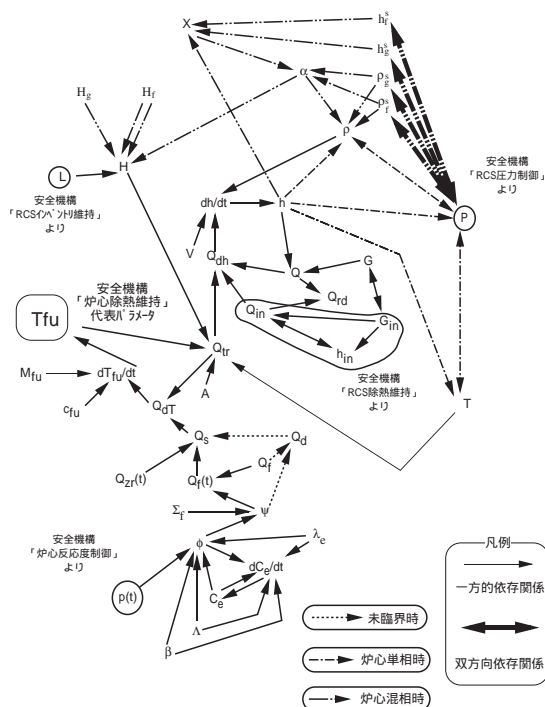


図4 安全機能規定因子「炉心徐熱維持」に関する変数の因果関係

構造方程式で表す。

- (2) 得られた仮定構造方程式の集合について、因果的順序付けのヒューリスティックに従い順序づけを行う。これにより各規定因子への物理的入力量および各規定因子の出力量を求める。

これらを各安全機能規定因子 i ($i=1,2,\dots,5$) 内の構成パラメータの因果的關係付けを行った結果を図

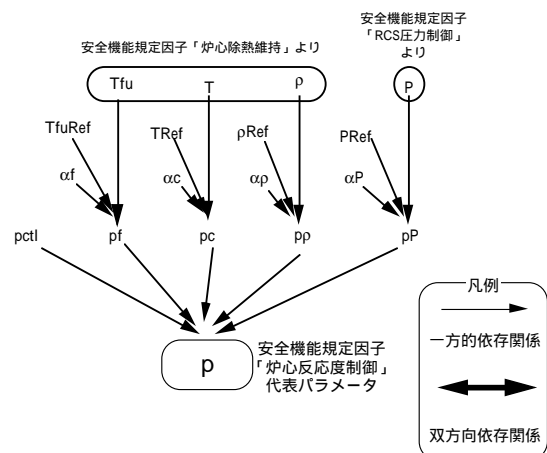


図5 安全機能規定因子「炉心反応度制御」に関する変数の因果関係

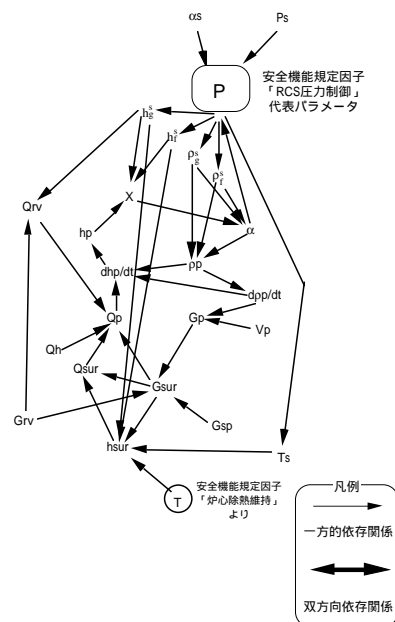


図6 安全機能規定因子「RCS圧力制御」に関する変数の因果関係

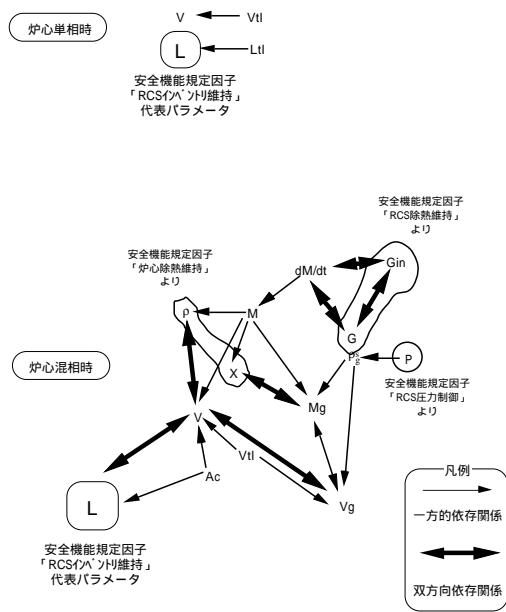


図7 安全機能規定因子「RCSインベントリ維持」に関する変数の因果関係

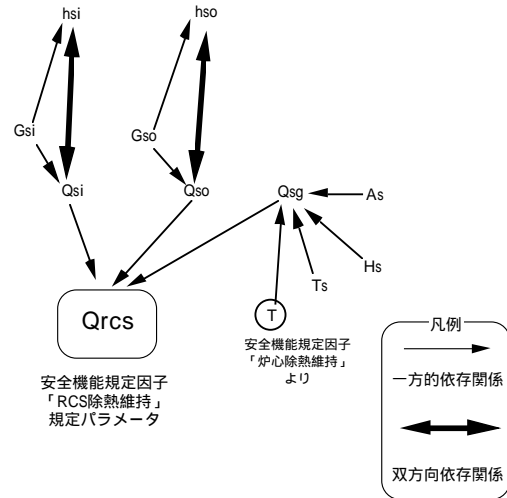


図8 安全機能規定因子「RCS徐熱維持」に関する変数の因果関係

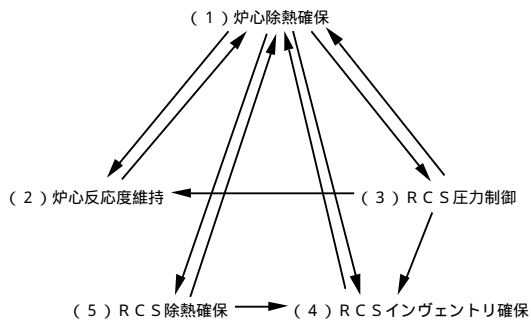


図9 安全機能規定因子間の因果関係 (仮定構造方程式により導出)

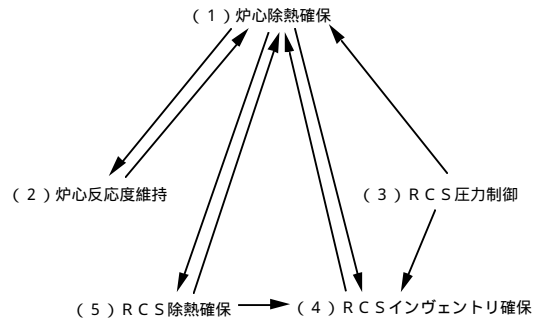


図10 安全機能規定因子間の因果関係 (実際の依存性)

4～図8にそれぞれ示す。さて、各安全機能規定因子を規定するパラメータあるいは目標を表すパラメータは、次のように考えられる。

- (1) 炉心除熱維持 T_{fu} : 燃料被覆管温度
- (2) 炉心反応度制御 p : 炉心反応度
- (3) RCS圧力制御 P : RCS圧力
- (4) RCSインベントリ維持 L : 原子炉水位
- (5) RCS除熱維持 Q_{rcs} : RCSからの除熱量

従って、これらのパラメータの因果関係を図4～図8から、調べれば安全機能規定因子間の経験的な

依存関係を導出することができる。このように、複数規定因子間でのこれら入出力量の因果的結合経路を同定した。これにより各規定因子が如何なる相互関係にあるかを把握した。その中でもプラント動作にとって主要な影響を有する関係を基に、炉心損傷回避を頂上事象とした場合の複数安全機能規定因子の因果的影響を経路をネットワーク的に表現した。この結果を図9の上部の枠内に示す。

このうち、図中(1)(3)の影響パスは、加圧器に入り込む炉心出口冷却材サージの温度のみの影響であり、一般に加圧器の圧力制御能力に対して影響が小さい。また、反応度に対する圧力フィードバック

クのパス(3)(2)も通常無視しうるものである。従って、より実地的な安全機能規定因子間の影響関係は図10の下部の枠内の図のようになる。式(3)に従えば、次のように記述することができる。

$$\begin{aligned}
 & d(SFD_1 \quad SFD_2), \\
 & d(SFD_2 \quad SFD_1), \\
 & d(SFD_3 \quad SFD_1), \\
 & d(SFD_1 \quad SFD_4), \\
 & d(SFD_4 \quad SFD_1), \\
 & d(SFD_1 \quad SFD_5), \\
 & d(SFD_5 \quad SFD_1), \\
 & d(SFD_3 \quad SFD_4), \\
 & d(SFD_5 \quad SFD_4)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

3. まとめ

従来、明確にされていなかった安全機能の定義と構造(各々の機能間の関係)を明確にした。その結果、安全機能は、Corcoranのいうように階層構造とはならず、ネットワーク型になることが判明した。物理則に基づき、ヒューリスティックを用いたといえ、客観的に記述できたことで、今後、安全機能規定因子維持のための操作検討に適用することが期待できる。今後は、安全機能規定因子の概念を取り入れた事故収束方法の考察に鋭意取り組む。最後に、安全機能の事故時運転操作の取り組みについて、京都大学エネルギー科学研究科の吉川榮和教授に貴重なサジェスチョンを賜り、東北大学原子核工学科の北村正晴教授には、研究の進め方に丁寧な指導を賜った。機能という概念について、岡山大学機械工学科の五福昭夫助教授に教示頂いた。ここに謝意を表

します。

参考文献

- (1) W. R. Corcoran, D. J. Finnicum et al., Nuclear Power-Plant Safety Functions, Nuclear Safety, Vol22, No.2 (1981)
- (2) W. R. Corcoran et al., Critical Safety Functions, Nuclear Technology, Vol.55 (1981)
- (3) M. Lind, Modeling Goals and Functions of Complex Industrial Plants, Applied Artificial Intelligence, Vol. 8, No.2 (1994)
- (4) 鷲尾 隆, 物理法則に基づく外的駆動型因果性の導出, 人工知能学会誌, Vol.5, No.4 (1990)
- (5) Simon, H.A.: Models of Discovery, D Reidel Pub. Co. Dordrecht, Holland (1977)

付録

- 付録1...安全機能規定因子「炉心除熱の維持」の安全機能規定因子物理モデルの仮定構造方程式
- 付録2...安全機能規定因子「炉心反応度制御」の安全機能規定因子物理モデルの仮定構造方程式
- 付録3...安全機能規定因子「RCS圧力制御」の安全機能規定因子物理モデルの仮定構造方程式
- 付録4...安全機能規定因子「RCSインベントリ制御」の安全機能規定因子物理モデルの仮定構造方程式
- 付録5...安全機能規定因子「RCS除熱の維持」の安全機能規定因子物理モデルの仮定構造方程式

付録-1

安全機能規定因子「炉心除熱の維持」の安全機能規定因子物理モデルの仮定構造方程式

熱収支及び質量収支基礎式

$$Q_{dT}/\frac{dT_{fu}}{dt} = M_{fu}c_{fu}, Q_{dT}-Q_s(t)+Q_{tr} = 0 \quad (1)$$

$$Q_{in}/h_{in} = G_{in}, Q/h = G, Q_{dh}/\frac{dh}{dt} = \rho V, Q_{dh}-Q_{tr}-Q_{in}+Q = 0 \quad (2)$$

$$G-G_{in} = 0 \quad (3)$$

M_{fu} : 燃料棒の質量(kg)= 90,200 (定数),

c_{fu} : 燃料棒の平均熱容量(J/kg-K)= 320 (定数),

V : 炉心冷却材のチャンネル体積(m^3)= 48.112 (= Vtl) (定数),

h_{in} : 炉心入口冷却材エンタルピ(J/kg)= 1253.16 × 103 (操作量, 一定値),

G_{in} : 炉心入口流量(kg/s)=12694.4 (操作量, 一定値),

T_{fu} : 燃料棒の平均温度(K)=2060 (初期値),

h : 炉心冷却材の液相部または混合部エンタルピ(J/kg)= 1343 × 103 (初期値),

$Q_s(t)$: 炉心発熱量(J/s),

Q_{tr} : 燃料棒から炉心冷却材への伝熱量(J/s),

G : 炉心流量(kg/s),

ρ : 炉心冷却材の液相部または混合部密度(kg/ m^3)

熱収支の関係式

$$Q_{tr} = AH(T_{fu}-T) \quad (4)$$

$$Q/h = G, Q_{in}/h_{in} = G_{in}, Q_{rd}-Q+Q_{in} = 0 \quad (5)$$

A : 燃料棒表面積(m^2)=3944 (定数),

H : 燃料棒から炉心冷却材液相部または混合部への熱伝達係数(J/ m^2 -K),

T : 炉心冷却材温度(K),

Q_{rd} : 炉心除熱量(J/s)

加圧水(単相液相)に関する関係式

$$F_T(T,h,P) = 0 \quad (6)$$

$$F_\rho(\rho,h,P) = 0 \quad (7)$$

P : 炉心圧力(Pa),

F_T : 加圧水状態曲線(K)(テーブル補間関数),

F_ρ : 加圧水密度曲線(kg/ m^3)(テーブル補間関数)

飽和水（単相液相）に関する関係式

$$F_{\rho}^{\text{sh}}(\rho_f^s, P) = 0 \quad (8)$$

$$F_h^{\text{sh}}(h_f^s, P) = 0 \quad (9)$$

F_{ρ}^{sh} : 飽和水密度曲線(kg/m³)(テーブル補間関数),

F_h^{sh} : 飽和水エンタルピ曲線(J/kg)(テーブル補間関数)

飽和蒸気（単相気相）に関する関係式

$$F_{\rho}^{\text{sg}}(\rho_g^s, P) = 0 \quad (10)$$

$$F_h^{\text{sg}}(h_g^s, P) = 0 \quad (11)$$

F_{ρ}^{sg} : 飽和蒸気密度曲線(kg/m³)(テーブル補間関数),

F_h^{sg} : 飽和蒸気エンタルピ曲線(J/kg)(テーブル補間関数)

混合相に関する関係式

$$X = \frac{h - h_f^s(P)}{h_g^s(P) - h_f^s(P)} \quad (12)$$

$$F_1(\alpha, X) = F_r(\rho_f^s(P), \rho_g^s(P)), \quad \alpha = \frac{X\rho_f^s(P)}{(1-X)\rho_g^s(P) + X\rho_f^s(P)} \quad (13)$$

$$r = \alpha\rho_g^s(P) + (1-\alpha)\rho_f^s(P) \quad (14)$$

X : 平衡クオリティ, α : ボイド率

飽和水（単相液相）及び飽和蒸気（単相気相）, 混合相全てに関する関係式

$$F^s(T, P) = 0 \quad (15)$$

: 飽和温度曲線(K)(テーブル補間関数)

冷却材液相部または混合部への熱伝達係数の相関式

$$H = \alpha H_g + (1-\alpha) H_f \quad (16)$$

または

$$H = H_g \quad \text{if } x < L$$

$$H = H_f \quad \text{if } x > L$$

H_g : 単相気相に対する熱伝達係数(J/m²-K)= 82.84 (定数),

H_f : 単相液相に対する熱伝達係数(J/m²-K)= 463.4 (定数)

炉心中性子束の動特性

$$\phi(t) = \frac{\Lambda}{\beta - \rho(t)} \lambda_c C_c(t) \quad (17)$$

$$\frac{dC_c(t)}{dt} - \frac{\beta}{\Lambda} \Phi(t) + \lambda_c C_c(t) = 0 \quad (18)$$

β : 遅発中性子割合 = 6.4×10^3 (定数),

Λ : 即発中性子寿命(s) = 1.0×10^{-4} (定数),

λ_c : 1群縮約の崩壊定数(/s) = 0.07687 (定数),

$\rho(t)$: 反応度, $\phi(t)$: 中性子束, $C_c(t)$: 1群縮約の遅発中性子先行核数

中性子束と核分裂速度の関係式

$$\psi(t)/\phi(t) = \Sigma_f \quad (19)$$

Σ_f : 核分裂断面積(/m) = 54.2 (定数),

$\psi(t)$: 核分裂速度(/s),

臨界時($\rho(t) \geq 0$)の炉心出力

$$Q_s(t) = Q_f \psi(t) + Q_{zr}(T) \quad (20)$$

Q_f : 直接の核分裂エネルギー(J) = 3.2042×10^{-11} (定数),

Q_{zr} : 燃料棒被覆管のジルコニウム - 水反応発熱(J/s) = 0.0 (操作量, 一定値)

未臨界時($\rho(t) < 0$)の炉心出力

$$Q_s(t) = Q_d(t) + Q_f \psi(t) + Q_{zr}(T) \quad (21)$$

$Q_d(t) = 0.045 Q_f \Psi(t) e^{-4.5 \times 10^{-4} t}$: 崩壊熱の時間減衰曲線(J/s)

付録-2

安全機能規定因子「炉心反応度制御」の安全機能規定因子物理モデルの仮定構造方程式

反応度に係る相関式

$$p(t) = p_{\text{ctrl}}(t) + \alpha_f(T_{\text{fu}} - T_{\text{fu}}^{\text{ref}}) + \alpha_c(T - T^{\text{ref}}) + \alpha_\rho(\rho - \rho^{\text{ref}}) + \alpha_p(P - P^{\text{ref}}) \quad (22)$$

α_f : 燃料棒温度係数(/K) = -2.9×10^3 (定数),

α_c : 冷却材温度係数(/K) = -6.3×10^{-2} (定数),

α_ρ : 冷却材密度係数(m^3/kg) = 0.0 (定数),

α_p : 圧力係数(/Pa) = 4.35×10^{-10} (定数),

$T_{\text{fu}}^{\text{ref}}$: 参照基準燃料棒温度(K) = 652.15 (定数),

T^{ref} : 参照基準冷却材温度(K) = 576.15 (定数),

ρ^{ref} : 参照基準冷却材密度(kg/m^3) = 727.64 (定数),

P^{ref} : 参照基準圧力(Pa) = 15.8×10^6 (定数),

$p_{\text{ctrl}}(t)$: 制御操作による印加反応度 = 0 4 (操作量, 62秒間でランプ状増加),

$p(t)$: 反応度

付録-3

安全機能規定因子「RCS圧力制御」の安全機能規定因子物理モデルの仮定構造方程式

熱収支及び質量収支基礎式

$$\rho_p V_p \frac{dh_p}{dt} = (G_{\text{sur}} h_{\text{sur}} + G_{\text{sp}} h_{\text{sp}} - G_{\text{rv}} h_g^s(P) + Q_h) \quad (23)$$

$$V_p \frac{d\rho_p}{dt} = G_{\text{sur}} + G_{\text{sp}} - G_{\text{rv}} \quad (24)$$

V_p : 加圧器体積(m^3) = 36.79 (定数),

h_{sp} : 加圧器スプレー流エンタルピ(J/kg) = 1253.16×10^3 (操作量, 一定値),

G_{sp} : 加圧器スプレー流量(kg/s) = 0.0 (操作量, 一定値),

G_{rv} : 加圧器逃し弁流量(kg/s) = 50.0 (操作量, 一定値),

Q_h : 加圧器ヒータ発熱量 (W/kg) = 0.0 (ヒータがオフの時) (操作量)
 1300×10^3 (ヒータがオフの時),

h_p : 加圧器内混合部エンタルピ(J/kg) = 1743.6×10^3 (初期値),

ρ_p : 加圧器混合部密度(kg/m^3) = 395.16 (初期値),

h_{sur} : 加圧器サージ流エンタルピ(J/kg), h_g^s : 加圧器逃し弁流エンタルピ(J/kg),

G_{sur} : 加圧器サージ流量(kg/s), P : 加圧器及び炉心圧力 (Pa)

圧力に関する関係式

$$P = (\alpha/\alpha_s)P_s \quad (25)$$

α_s : 標準ボイド率 = 0.4 (定数), P_s : 標準圧力 (Pa) = 15.8×10^6 (定数),
 α : ボイド率

混合相に関する関係式

$$X = \frac{h - h_f^s(P)}{h_g^s(P) - h_f^s(P)} \quad (13)$$

$$a = \frac{X\rho_f^s(P)}{(1-X)\rho_g^s(P) + X\rho_f^s(P)} \quad (14)$$

$$\rho = \alpha\rho_g^s(P) + (1-\alpha)\rho_f^s(P) \quad (15)$$

X : 平均クオリティ

サージ流のエンタルピー

$$\begin{aligned} h_{sur} &= h \text{ if } G_{sur} > 0 \text{ and } T < T^s(P) \\ h_{sur} &= h_g^s(P) \text{ if } G_{sur} > 0 \text{ and } T \geq T^s(P) \\ h_{sur} &= h_f^s(P) \text{ if } G_{sur} \leq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

h : 炉心冷却材エンタルピー (J/kg)

付録-4

安全機能規定因子「RCS インベントリ制御」の安全機能規定因子物理モデルの仮定構造方程式

炉心冷却材が単相液相の場合 ($X \leq 0$) の幾何学的条件

$$V = V_{cl} \quad (27)$$

$$L = L_{cl} \quad (28)$$

V_{cl} : 炉心冷却材チャンネル全体積 (m^3) = 48.112 (定数),

L_{cl} : 炉心冷却材満水水位 (m) = 12.4 (定数),

V : 炉心冷却材の液相部または混合部チャンネル体積 (m^3),

L : 炉心冷却材水位 (m)

炉心冷却材が混合相の場合 () の幾何学的条件

$$V_g = \frac{\rho V}{\rho_g^s(P)} X \quad (29)$$

$$V = V_{fl} - V_g \quad (30)$$

$$L = V/A_c \quad (31)$$

A_c : 炉心冷却材チャンネル断面積 (m^2) = 3.88 (定数),

ρ : 炉心冷却材の液相部または混合部密度 (kg/m^3),

X : 炉心冷却材の平衡クオリティ ,

P : 炉心圧力 (Pa),

ρ_g^s : 飽和水密度曲線 (kg/m^3),

V_g : 炉心上層気相バルク体積 (m^3)

付録-5

安全機能規定因子「RCS除熱の維持」の安全機能規定因子物理モデルの仮定構造方程式

熱収支の関係式

$$Q_{so}/h_{so} = G_{so}, Q_{si}/h_{si} = G_{si}, Q_{rcs} - Q_{so} + Q_{si} - Q_{sg} = 0 \quad (32)$$

$$Q_{sg} = A_s H_s (T - T_s) \quad \text{if } X \leq 0 \quad (33)$$

$$Q_{sg} = 0 \quad \text{if } X > 0$$

A_s : 蒸気発生器伝熱面積 (m^2) = 4870 (定数),

H_s : 蒸気発生器伝熱係数 ($J/m^2 \cdot K$) = 4000 (定数),

T_s : 蒸気発生器 2 次側温度 (K) = 528.5 (定数),

h_{so} : RCS 流出冷却材エンタルピ (J/kg) = 1337.8×10^3 (操作量 , 一定値),

h_{si} : RCS 流入冷却材エンタルピ (J/kg) = 98.3×10^3 (操作量 , 一定値),

G_{so} : RCS 流出冷却材流量 (kg/s) $3.0 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^3$
(操作量 , 62 秒間でランプ状減少),

G_{si} : RCS 流入冷却材流量 (kg/s) = 0.0 (操作量 , 一定値),

Q_{sg} : 蒸気発生器除熱量 (J/s),

Q_{rcs} : R C S 除熱量 (J/s),

T : 炉心温度 (K),

X : 炉心平衡クオリティ