

# ATWS事象のRELAP5 (Mod.3.2) による解析

## Analysis and Evaluation for ATWS Event by RELAP5 (Mod.3.2)

柳 千裕 (Chihiro Yanagi) \*<sup>1</sup>

富合 一夫 (Ichio Tomiai) \*<sup>2</sup>

**要約** この研究では、原子力安全システム研究所で既にプラント情報がほぼ整備されているRELAP5 (Mod.3.2) コードを用い、主給水流量喪失事象発生時に原子炉停止機能喪失 (ATWS, Anticipated Transient Without Scram) が重なった場合について、蒸気発生器 (SG) 狭域水位低信号によるタービントリップと補助給水による緩和措置の効果を調べる目的で解析を実施した。解析結果から、原子炉冷却材圧力バウンダリの健全性が損なわれることなく、事象は収束に向うことが分かった。また、タービントリップは、SG除熱機能喪失前までの原子炉出力低下を促進させる効果があることがわかった。

**キーワード** 加圧水型軽水炉, RELAP5 (Mod.3.2), ATWS, 主給水流量喪失

**Abstract** In this study, the RELAP5 (Mod.3.2) code with well-maintained plant information was used to analyze the ATWS (anticipated transient without scram) incident during a loss of main feed water accident with the additional condition of a turbine trip and auxiliary feed-water injection which was initiated by the steam generator (SG) narrow range water level low signal. The effect was checked by confirming the integrity of the reactor coolant pressure boundary. These analyses showed that the turbine trip and auxiliary feed-water injection led this accident progression towards convergence without any degradation of the reactor coolant pressure boundary. Also, it was found that the turbine trip was effective to reduce the reactor power to the power at the time of the SG heat removal loss.

**Keywords** pressurized water reactor, RELAP5 (Mod.3.2), ATWS, loss of main feed water

## 1. はじめに

原子力安全システム研究所 (以下「INSS」という) では、熱水力解析コードを用い、現実的解析による安全管理方法の充実・提言、事故時の炉心健全性の評価を目的に各種事象の解析を行ってきた。

一方、実用発電用原子炉の新規制基準では、重大事故等対策の有効性評価で、原子炉の出力運転中に、原子炉トリップが必要な起因事象に原子炉停止機能喪失 (ATWS, Anticipated Transient Without Scram) が重畳した事象が重要事故シーケンスとして新たに上げられている。

これに対し、発電事業者は、炉心が著しい損傷に至ることなく、かつ、十分な冷却を可能とするため、タービントリップ、主蒸気ライン隔離及び補助給水ポンプを自動作動させるATWS緩和措置を整備することとしている。このATWS緩和措置がとられ

ない場合には、過渡変化発生時に原子炉出力が高いままに維持されるため、一次系が高温・高圧状態となり、加圧器安全弁等からの漏えいが継続し、炉心損傷に至る可能性がある。

本研究ではこのATWS事象に着目し、起因事象として主給水流量喪失を対象とした。この起因事象は、原子炉の出力運転中に、主給水ポンプ、復水ポンプ又は給水制御系の故障等により、すべての蒸気発生器 (SG) への給水が停止し、原子炉からの除熱能力が低下する事象を想定したものである。

解析では、INSSで既にプラント情報がほぼ整備されているRELAP5 (Mod.3.2) コード<sup>(1)</sup>を用いることとし、主給水流量喪失事象発生時にATWSとなった場合、ATWS緩和措置のうちのタービントリップと補助給水の効果を把握するための解析を実施した。

\*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

\*2 (株)シー・エス・エー・ジャパン

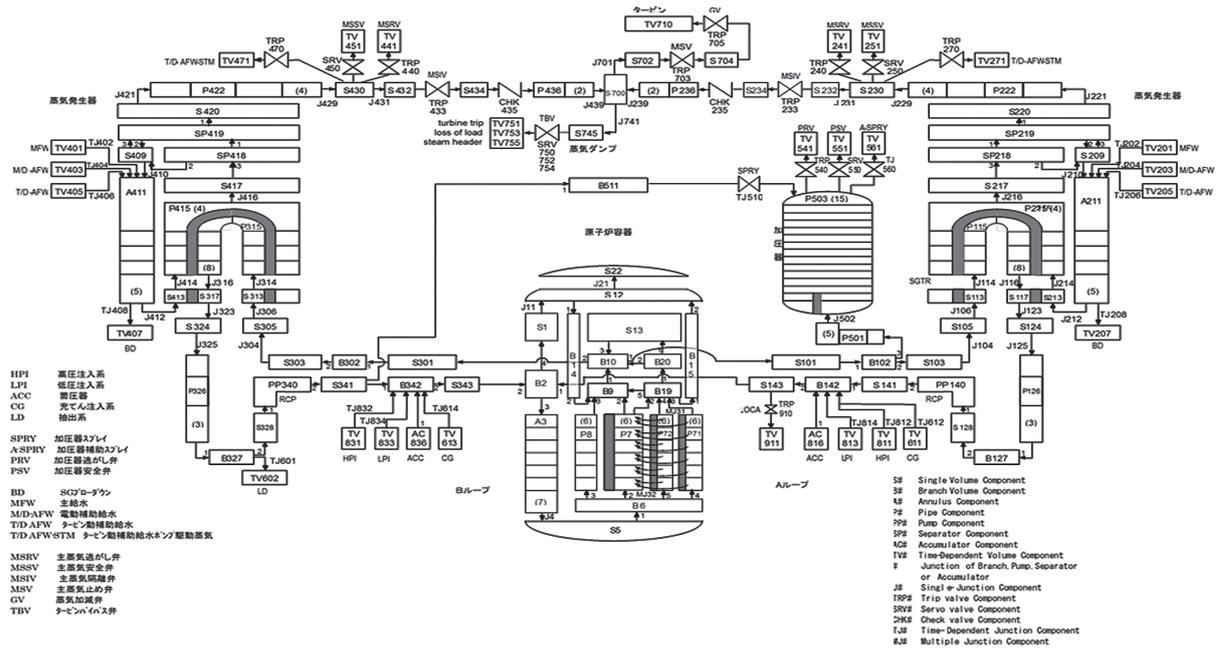


図1 ノード図 (図中の番号はコンポーネント番号を示す)

2. 解析モデルと解析条件等

2.1. 解析モデル

RELAP5 (Mod.3.2) コードで用いるノード図の例を図1に示す. 3ループ炉の場合はノード図上のBループには2ループ分の流量を持たせ, 4ループ炉ではBループに3ループ分の流量をもたせることで簡略化している. 解析に先立ち, SG狭域水位低信号によるタービントリップ制御回路の入力データを作成するとともに, 水力等価直径データ等を再整備し, 入力データのうち解析結果に大きな影響を与えるデータの妥当性を確認した. また, 解析体系全体の定常計算を実施し, 炉出力や一次冷却材平均温度 ( $T_{avg}$ ) といった主要なパラメータが目標値に収束する状況を確認した.

2.2. 解析ケース, 解析対象と過渡解析条件

解析ケースを表1に示す. 基本ケースとしての主

表1 解析ケース

ケース	解析ケース
A	主給水流量喪失
B	主給水流量喪失 + ATWS
C	主給水流量喪失 + ATWS + ATWS緩和措置

給水流量喪失事象 (ケースA) にATWS事象が同時発生した場合 (ケースB) のほか, ATWS緩和措置のうちのタービントリップと補助給水の効果を把握するためのケースCの3ケースを設定した.

解析対象はPWRプラントの3ループ炉を対象とした. 表2に主要過渡解析条件を示す.

表2 過渡解析条件

ケース	A	B	C
起因事象	主給水流量喪失		
定常状態	定格		
SG狭域水位低設定点	9%		
原子炉トリップ	作動	不作動 (ATWS)	
タービンバイパス	なし		あり
主蒸気逃がし弁	作動		
主蒸気安全弁	作動		
加圧器逃がし弁	作動		
加圧器安全弁	作動		
加圧器スプレイ	不作動		
加圧器ヒータ	作動		
制御棒制御系	不作動		
外部電源	あり		
減速材温度係数 (初期値)	-13 pcm/°C		
MD-AFWP作動遅れ	SG狭域水位低 +60s		
MD-AFWP	3基のSGに合計95 m <sup>3</sup> /hr		
TD-AFWP作動遅れ	SG狭域水位低 +60s		
TD-AFWP	3基のSGに合計95 m <sup>3</sup> /hr		

### 3. 解析結果

表3にクロノロジーを示す。また、各解析ケースについて、系全体の挙動に着目して述べる。

表3 事象のクロノロジー（数字は秒数）

解析ケース	A	B	C
主給水流量喪失	0		
SG給水流量低信号	19	19	19
SG狭域水位低	26	30	30
原子炉トリップ信号発信	19	-	-
タービントリップ（原子炉トリップ）	19	-	-
タービントリップ（SG狭域水位低+10秒）	-	-	40
タービンバイパス弁開	19	-	40
主蒸気安全弁 開	-	-	54
主蒸気安全弁 閉	-	-	87
MD-AFWP起動（SG狭域水位低+60秒）	86	90	90
TD-AFWP起動（SG狭域水位低+60秒）	86	90	90
ECCS信号発信（タービンバイパス弁閉）	-	-	104

#### 3.1. 各解析ケースの挙動

##### (1) ケースA（主給水流量喪失単独）

図2に炉出力と加圧器圧力の時間推移を、図3にSG二次側水位と主蒸気圧力の時間推移を示す。主給水流量喪失により、SG二次側水位は低下し始め

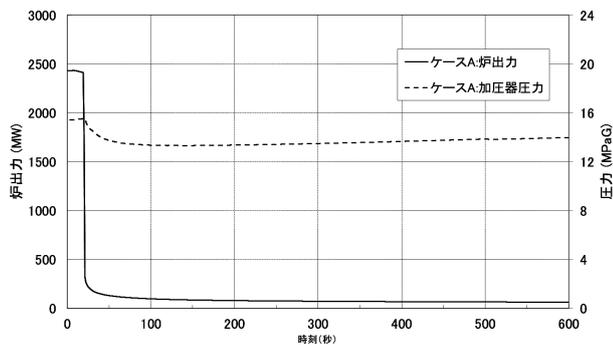


図2 炉出力と加圧器圧力の時間推移（ケースA）

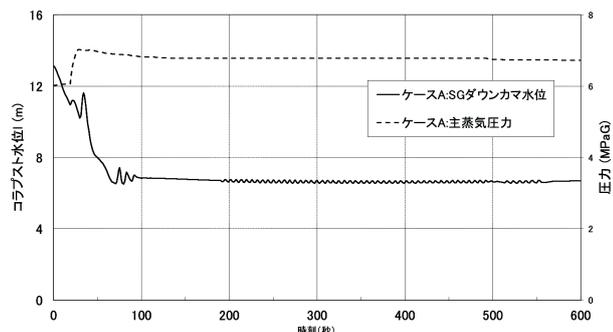


図3 SG二次側水位と主蒸気圧力の時間推移（ケースA）

る。時刻19秒にSG給水流量低信号が発信され、原子炉がトリップし、制御棒挿入により原子炉出力は低下し始める。その直後、時刻22秒に加圧器圧力が最大値15.6 MPaGとなる。原子炉トリップに伴いタービンもトリップし、SG二次側圧力が急上昇すると同時に、タービンバイパス弁が開放され、主蒸気が復水器に導かれるが、SG二次側水位は急減を続け、時刻26秒にSG狭域水位低信号が発信される。SG狭域水位低信号発信の60秒後に電動補助給水ポンプ（MD-AFWP）とタービン動補助給水ポンプ（TD-AFWP）が起動し、SG二次側に給水される。タービンバイパス弁の作動と補助給水の注入により炉心は冷却され、過渡は収束に向かう。

##### (2) ケースB（主給水流量喪失+ ATWS）

主給水流量喪失により、SG二次側水位は急減を始める。時刻19秒にSG給水流量低信号が発信されるが、本解析ではATWSを想定しているため、原子炉トリップ信号は発信されない。そのため炉出力はほぼ定格のまま推移する。SG二次側水位は、更に低下し、時刻30秒にSG狭域水位低信号が発信される。SG狭域水位低信号の60秒後の時刻90秒にMD-AFWPとTD-AFWPが作動し、SG二次側水位の低下は緩和される。SG二次側水位の低下によりSGでの除熱能力が減少するので $T_{avg}$ が上昇し、一次系保有水が体積膨張し始める。このため、一次系保有水は加圧器へ流入し、加圧器水位が上昇し、蒸気空間が圧縮されて原子炉圧力が高まる。また、 $T_{avg}$ 上昇は減速材密度減少による負の反応度効果を増加させて炉出力の低下とホットレグ内での沸騰を引き起こす。この沸騰に起因して、時刻161秒にボイドの巻き込みにより一次冷却材ポンプがトリップし、一次冷却材流量は低下して自然循環流に移行する。時刻88秒に加圧器逃がし弁が、時刻93秒に加圧器安全弁が開くものの、原子炉圧力は上昇を続ける。時刻99秒から加圧器水位は満水状態となる。しかしその後、炉出力の低下とSGの除熱により、原子炉圧力は時刻109秒に21.4 MPaGまで上昇した後、下降に転じる。

##### (3) ケースC

（主給水流量喪失+ ATWS + ATWS緩和措置）

SG狭域水位低信号が発信されるまでは、ケースBと同じである。

時刻40秒にタービントリップ及びタービンバイ

パス弁の開放が起こる。タービントリップにより、主蒸気流量が急減して、SG二次側圧力が上昇することでSG伝熱量が減少するため、一次系保有水からの除熱が減り、 $T_{avg}$ の上昇を引き起こし、更に減速材密度減少に伴う負の反応度添加によって炉出力が低下する。その後、炉出力の低下に伴って、ドップラ反応度が増加し減速材反応度とバランスするため、炉出力の低下は時刻95秒で止まる。一方、SG二次側水位の低下に伴い、SG伝熱量が急減するため、 $T_{avg}$ は更に上昇し始める。 $T_{avg}$ 上昇に伴い減速材反応度効果を介して炉出力が低下し、SG伝熱量が炉出力を上回るため、時刻116秒に原子炉最高圧力は19.8 MPaGに達した後、 $T_{avg}$ は低下に転じる。SG狭域水位低信号の60秒後の時刻90秒にMD-AFWPとTD-AFWPが起動し、SG二次側に給水される。続いて主蒸気流量高信号と主蒸気圧力低信号の同時発信により、時刻104秒に安全注入(SI)信号が発信され、タービンバイパス弁が閉鎖される。主蒸気安全弁の動作および主蒸気逃し弁の間欠的な開閉による蒸気放出と補助給水の注入により、過渡は収束に向かう。

### 3.2. 原子炉圧力評価結果

表4に原子炉圧力評価結果を示す。ケースBは事故時の判断基準圧力(最高使用圧力の1.2倍である20.59 MPaG)を上回る結果であったが、ケースCでは事故時の判断基準圧力を下回る結果であり、ATWS緩和設備による効果が見られた。

### 3.3. 過渡解析条件の影響評価

表4 各解析ケースの原子炉圧力評価結果

解析ケース	A	B	C
原子炉最高圧力 (MPaG)	15.6	21.4	19.8

3.1節の結果から、タービントリップと補助給水の効果をケースBとケースCとの比較により考察する。図4には炉出力と加圧器圧力の時間推移を、図5にはSG二次側水位と主蒸気圧力の時間推移を示す。

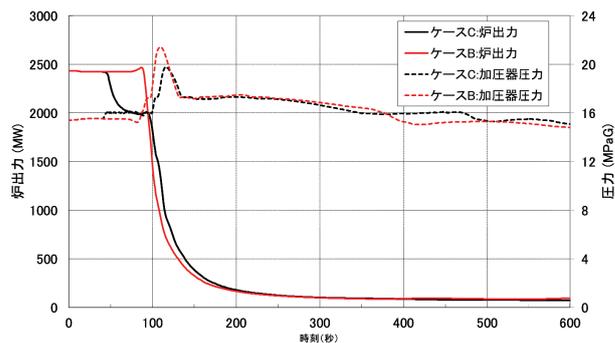


図4 炉出力と加圧器圧力の時間推移(ケースB, C)

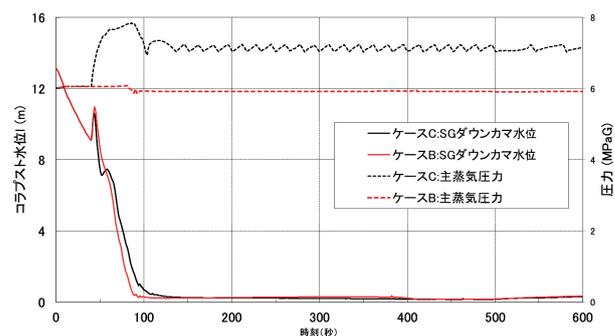


図5 SG二次側水位と主蒸気圧力の時間推移(ケースB,C)

ケースCのタービントリップは、主蒸気圧力の上昇を引き起こす(図5の黒色点線)。主蒸気圧力の上昇は、 $T_{avg}$ とSG二次側保有水との温度を接近させ、一次系からの除熱能力を早期に悪化させる。主給水流量を喪失しているため、ケースBとケースC共に、SG二次側水位が急峻に低下することで、一次系からの除熱能力の喪失が早まる。ケースCでは主蒸気圧力の上昇に伴うSG伝熱量の減少により主蒸気圧力が高めに推移するものの、除熱能力の喪失はケースBと同様に起こる。除熱能力の喪失により、 $T_{avg}$ は急激に上昇し、一次系冷却材の体積膨張によって加圧器水位は上昇し、加圧器圧力も増加する。除熱能力の悪化・喪失は、 $T_{avg}$ 上昇を引き起こし、その結果、減速材密度フィードバック反応度を増加させ、炉出力(図4の実線)の急激な低下を引き起こす。ケースCでは除熱能力の悪化と喪失による、ケースBでは除熱能力の喪失による炉出力の低下が見られる。特に、除熱能力の喪失は、一次系内に発熱が急速に蓄積されて、 $T_{avg}$ の急激な上昇を引き起こすため、除熱能力の喪失開始時(SG二次側水位がほぼゼロになる時刻を言い、ケースBとCとも時刻約90秒)の炉出力の値が過渡事象を如何に収束させるかにおいて重要と考えられる。

除熱能力の喪失開始時の炉出力は、ケースBでは約2,500 MW、ケースCでは約2,000 MW、加圧器

圧力がピークとなる時点（ケースB：時刻109秒，ケースC：時刻116秒）での炉出力はケースBとケースCとも約1,000 MWである。

この結果から，ケースBでは約1,500 MW，ケースCでは約1,000 MWの発熱が一次系内に蓄積される結果となったため，原子炉最高圧力の評価でケースBが，ケースCを上回ったと考えられる。

以上の検討から，主給水流量喪失時にはSG除熱能力の喪失を回避できないため，SG除熱能力の喪失前までに如何に炉出力を低下させるかがポイントとなる。

タービントリップにより，主蒸気流量が急減して，SG二次側圧力が上昇することでSG伝熱量が減少するため，SG除熱能力が悪化し，その結果， $T_{avg}$ が上昇し，負の減速材温度係数によりケースCの炉出力がケースBに比べ早く低下する。つまり，タービントリップは，炉出力を低下させる効果があり，ATWS時には有効であることを確認できた。

#### 4. まとめ

新規制基準で取り上げられている事故シーケンスグループATWS事象に対し，ATWS緩和措置のうちのタービントリップと補助給水の効果を把握する目的で解析を実施した。RELAP5 (MOD3.2) を用いた結果から，以下の結論を得た。

- ① 主給水流量喪失時に原子炉トリップ信号が発信されない，いわゆるATWSが発生した場合，SG水位低信号による早期のタービントリップと補助給水により，原子炉冷却材圧力バウンダリの健全性が損なわれること無く，過渡事象は収束に向うことが確かめられた。
- ② 主給水流量喪失時にはSG除熱能力の喪失を回避できないため，SG除熱能力の喪失前までに如何に炉出力を低下させるかが，過渡事象を如何に収束させるかにおいてポイントとなる。タービントリップはSG除熱能力を悪化させ，その結果， $T_{avg}$ が上昇し，負の減速材温度係数により炉出力を低下させる効果があり，ATWS発生時にはこのタービントリップが有効であることを確認できた。

#### 文献

- (1) The RELAP5 Code Development Team, RELAP5/MOD3 Code Manual, INEL-95/0174, (1995).