

超臨界圧軽水冷却原子炉の制御系チューニング

池尻 智史, 石渡 祐樹

現行原子炉プラントはすべての状態変化にわたって原子炉の主要なパラメータが適正な範囲に収まるように制御されている。新型原子炉概念である超臨界圧軽水冷却原子炉も同様に制御する必要がある。そこで制御工学の基礎である比例制御、積分制御と超臨界圧軽水冷却原子炉用の熱水力学計算コードを用い、超臨界圧軽水冷却原子炉に適した制御系を設計し、実際に外乱を与えた場合の挙動を解析して、安定に収束することを示した。

キーワード：超臨界圧軽水冷却原子炉プラント、制御系チューニング、比例制御

1. はじめに

原子炉プラントは起動・停止、昇温昇圧、定常運転、出力変更、過渡変化などの状態変化すべてにわたって原子炉の主要なパラメータ（圧力、出力、蒸気温度など）が適正な範囲に収まるように制御が行われている。それはどの原子炉にも例外はなく、新型原子炉概念である超臨界圧軽水冷却原子炉にも同じことがいえる。超臨界圧軽水冷却原子炉とは東京大学で開発されている新しいタイプの原子炉であり、現行の原子炉よりも高温高压な超臨界圧水を原子炉の冷却材に用い、より高効率で建設コストの安い原子炉となりうる概念である[1]~[3]。そして概念設計の段階である超臨界圧軽水冷却原子炉の制御を考慮にするにあたり、制御工学でも基本的な比例制御と積分制御を用いることとした[4]。制御するパラメータは圧力、出力、主蒸気温度の3つとし、それぞれの制御系のチューニングを行い超臨界圧軽水冷却原子炉の制御系の特性を示した。

2. 制御系の設定

超臨界圧軽水冷却原子炉の制御を行う機器を図1に示す。原子炉の圧力を主蒸気加減弁で、出力を制御棒で、蒸気の出口温度給水ポンプからの給水流量によって制御を行う。

2.1 圧力制御系

原子炉の圧力は主蒸気加減弁の開度によって行う。原子炉内の圧力が高くなると主蒸気加減弁を開けて原子炉から流出する冷却材流量を増やす。そして炉内の

保有冷却材量を減らすことにより炉内の圧力を下げる。圧力が低くなった場合、この逆の動作を行う。タービン圧力とタービン圧力設定値の関係式は以下のようになる。

$$V_r(t) = 100 + \frac{P(t) - P_{set}}{K} \quad (1)$$

P [MPa]：タービン入口圧力

P_{set} [MPa]：タービン入口設定圧力

K [MPa]：圧力調定率

V_r ：主蒸気加減弁 開度要求信号

2.2 主蒸気温度制御系

主蒸気の温度は主給水ポンプの流量で行う。主蒸気の温度が設定温度よりも低かった場合、主給水流量を減らすことにより炉心から出てくるときの蒸気の温度を上げる。主蒸気温度が高い場合は逆の操作も行う。一般的に熱が物体に伝わるには時間がかかるので、この制御系には比例制御だけでなく積分制御も考慮する。使用する式は以下のものを用いる

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

$$e(t) = \frac{T_{lead-lag} - T_{set}}{T_{set}} \times 100 \quad (3)$$

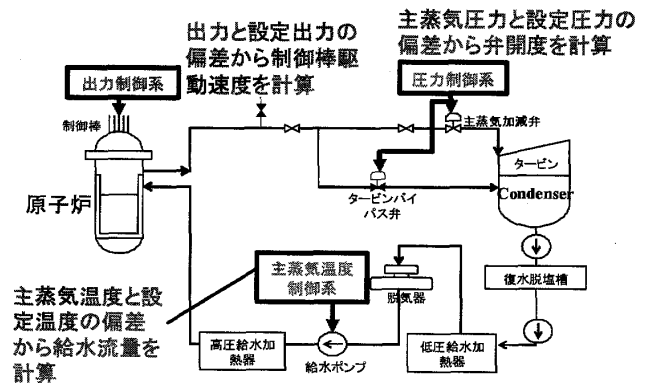


図1 超臨界圧軽水冷却原子炉の制御機器

いけじり さとし, いしわたり ゆうき
東京大学 大学院工学系研究科原子力専攻
〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22

$u(t)$ [%]: 給水要求信号

$e(t)$ [%]: 主蒸気温度偏差

$T_{lead-lag}$ [°C]: 実際の主蒸気温度

T_{set} [°C]: 主蒸気温度設定値

K_P : 比例ゲイン

K_I : 積分ゲイン

2.3 出力制御系

原子炉の出力は炉内で発生する中性子の量に比例する。そのため原子炉の出力を制御するためには中性子の量を調整する必要がある。原子炉内に中性子を吸収する制御棒を入れることで制御する。出力を上げたいときは制御棒を引き抜き、出力を下げたいときは制御棒を挿入する。出力制御も比例制御で行うが、出力の変動速度が速すぎると原子炉に悪い影響を与える可能性がある。出力の変動速度には上限を設けている。そのため出力制御に用いる式は以下のようになる。

$$v = \begin{cases} v_{\max} e/b (e < b) \\ v_{\max} & (e \geq b) \end{cases} \quad (4)$$

v [cm/s]: 制御棒駆動速度

v_{\max} [cm/s]: 制御棒駆動速度の最大値

e [%]: 出力偏差

b [%]: 比例領域の最大出力偏差

3. 制御系のチューニング

制御系の動作は圧力制御系に対しては圧力調定率、主蒸気温度制御系に対しては比例ゲインと積分ゲイン、出力制御系に対しては比例領域の最大出力偏差の大きさによって挙動が大きく異なるので、これをチューニングする必要がある。圧力、主蒸気温度、出力の中で圧力は変動速度も速く、影響も大きいことから最初にチューニングを行い、主蒸気温度制御系、出力制御系の順にチューニングを行う。

チューニングはオーバーシュート（最初のピークの値と設定値の差）と制定時間（実際の値が設定値の付近で安定するまでの時間）を小さくするように行った。さらにその中でも値の振動の小さいものを選択した。

3.1 圧力制御系のチューニング

圧力制御系に対して圧力調定率 K のチューニングを行った結果を図2に示す。 $K=1$ のときはオーバーシュートが大きくなり、 $K=10$ のときは設定値付近に収束しなかった。さらに細かいパラメータサーベイを行い、最終的に圧力調定率の値は $K=3.1$ とした。

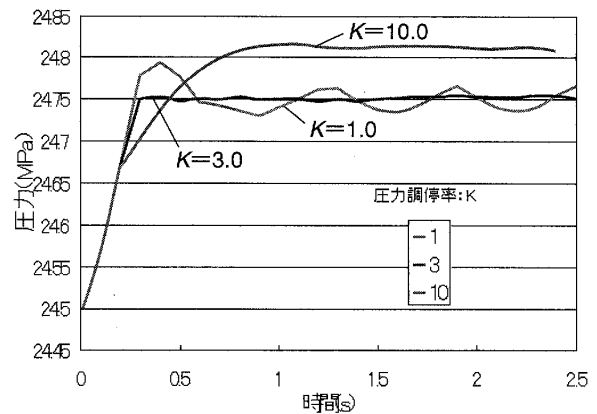


図2 圧力制御系チューニング

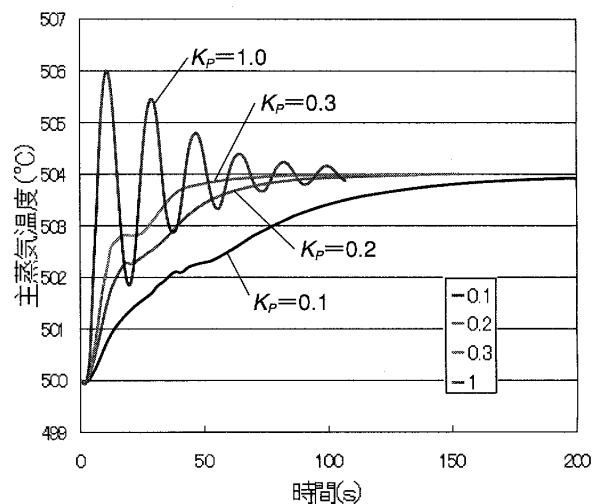


図3 主蒸気温度系比例ゲインチューニング

3.2 主蒸気温度制御系のチューニング

主蒸気温度制御系はチューニングするパラメータが比例ゲインと積分ゲインと二つある。そこでまず積分ゲインを0にした状態で比例ゲインに対してチューニングを行い、その後、積分ゲインに対してチューニングを行った。比例ゲインのチューニングの結果を図3に、積分ゲインのチューニングの結果を図4に示す。図3より比例ゲインが小さすぎると制定時間が長く、大きすぎると主蒸気温度が振動することがわかった。積分ゲインは大きくなればなるほど設定値から差が大きくなることがわかった。最終的に比例ゲインの値は0.3、積分制御は必要ないということがわかった。

3.3 出力制御系チューニング

最大出力偏差 b に対してチューニングを行った。最大出力偏差を大きくするとオーバーシュートが大きくなり、小さくすると制定時間が長くなることがわかった。結果、最大出力偏差 b を0.35とした(図5)。

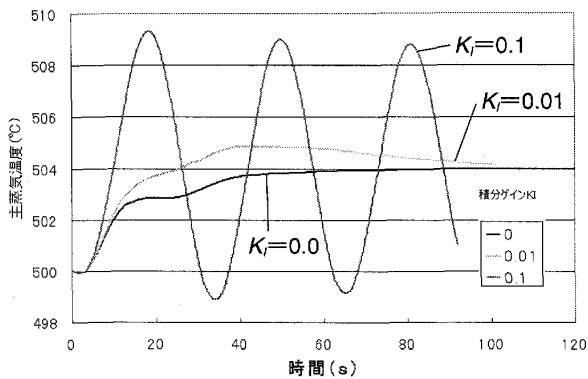


図4 主蒸気温度積分ゲインチューニング

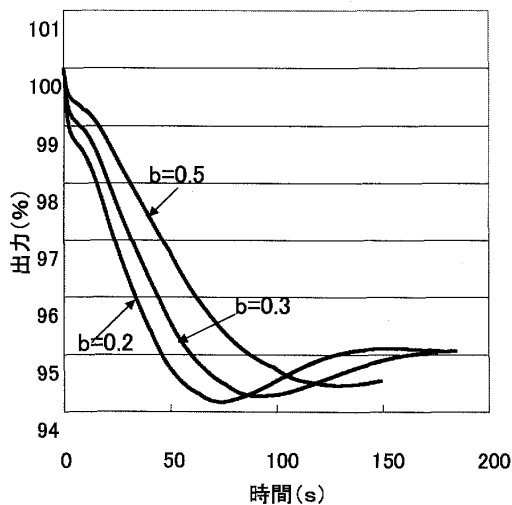


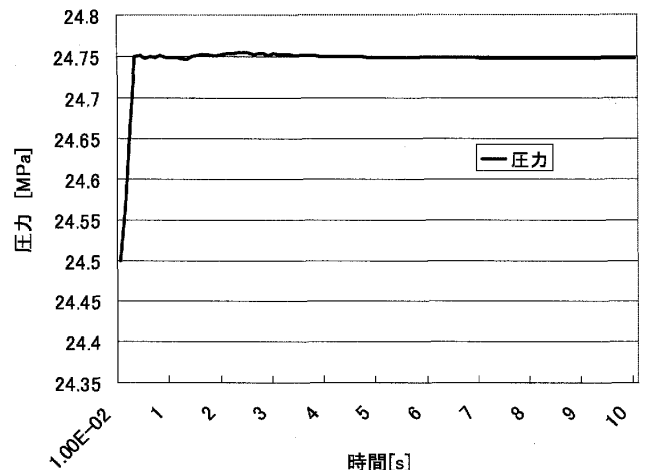
図5 出力制御系最大出力偏差チューニング

4. 外乱に対するプラント安定性評価

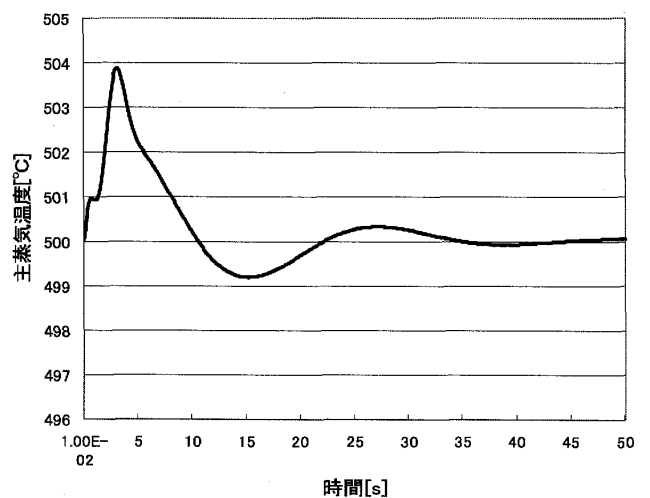
実際に設定した制御系を用いた原子炉プラントに外乱を与えたときのプラント安定性を解析した。想定した外乱は以下6つとした。

- ・ 出力設定値を変える。
- ・ 主蒸気圧力設定値を変える。
- ・ 主蒸気温度設定値を変える。
- ・ 主蒸気加減弁開度を変える。
- ・ 給水流量を変える。
- ・ 給水温度を変える。

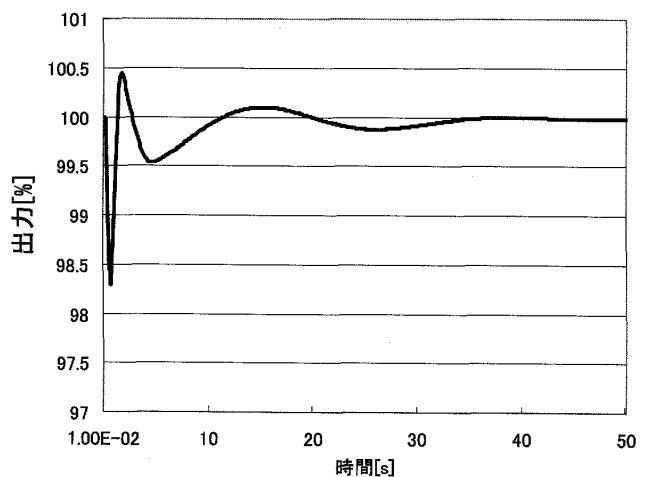
ここでは例として“主蒸気圧力設定値を変える”を示す。具体的には事象開始時に主蒸気圧力設定値を2.5 bar あげた場合、どのような挙動を示すかを解析した。図6に結果を示すように圧力、主蒸気温度、出力が50秒以内に収束しており、オーバーシュートも小さく安定に制御できているといえる。他の事象についても解析を行い、同様の結果を得られた。



(a) 圧力



(b) 主蒸気温度



(c) 出力

図6 外乱“出力設定点+2.5 bar”の解析

5. 結論

超臨界圧軽水冷却原子炉の制御系をチューニングし、外乱に対しても安定した運転をできる原子炉プラントを設計し、制御系に対する超臨界圧軽水冷却原子炉プ

ラントの新特性を解析できた。

参考文献

- [1] 岡芳明他, 超臨界圧軽水冷却炉 UTNL-R0306, (1994).
- [2] 岡芳明他, 超臨界圧軽水冷却炉 UTNL-R0.55, (1994).

[3] 岡芳明, 山田勝巳, 超臨界圧軽水冷却炉の設計と開発, 日本混相流学会, Vol. 17, No. 3, pp. 236-242 (2003).

[4] JSME テキストシリーズ, 制御工学, 日本機械学会, (2002).