

簡易なモデルで 原子炉の過渡的な振る舞いを理解する

北海道大学 大学院工学研究院 千葉豪

はじめに

この教材は、別教材「やさしい臨界の話」「やさしい伝熱の話」を視聴しているという前提で作成されています。これらを視聴していない方には、まずこれらを視聴することをお勧めします（「やさしい臨界の話」で検索すると容易に辿りつけます）。

CEED開講科目
▶ 科学技術政策特論
▶ 創造的人材育成特別講義
▶ 企業と仕事特論
▶ グローバルマネジメント特論
産学連携教育プログラム
▶ インターンシップ
▶ ジョブ型研究インターンシップ
国際性啓発教育プログラム
▶ 実践科学技術英語
▶ Brush-Up英語講座
eラーニング教育プログラム
▶ eラーニング配信
▶ eラーニング制作
▶ ハイブリッド型授業支援

TOP > 原子力規制人材育成事業（原子力規制庁補助事業）

原子力規制人材育成事業（原子力規制庁補助事業）



オープン教材を活用した原子力規制人材育成プログラムの拡充

「原子力規制人材育成事業」は、国内の大学等における原子力規制に関わる人材を効果的・効率的・戦略的に育成する事業を支援することにより、原子力規制分野の教育研究を底上げするとともに、将来的に原子力規制を牽引する人材を育成することを目的とした原子力規制庁の事業です。北海道大学では、「オープン教材を活用した原子力規制人材育成プログラムの拡充」と題し、「確率論的安全評価」、「過酷事故・放射線物質の放出」、「原子炉工学」、「放射線防護」、「外部ハザードとその対応」の分野に関するオープン教材の開発と、それらの教材を活用した教育活動を行っており、CEEDはそのうちオープン教材の収録、制作、公開を支援しています。

オープン教材一覧

総論

導入教材

- [原子力規制の概要（山本章夫）](#)

原子炉工学

導入教材

- [やさしい伝熱の話（千葉豪）](#)
- [やさしい臨界の話（千葉豪）](#)

- 反応度フィードバック
- 原子炉の過渡応答
- 原子炉簡易動特性モデルを用いた過渡解析

反応度フィードバック

反応度

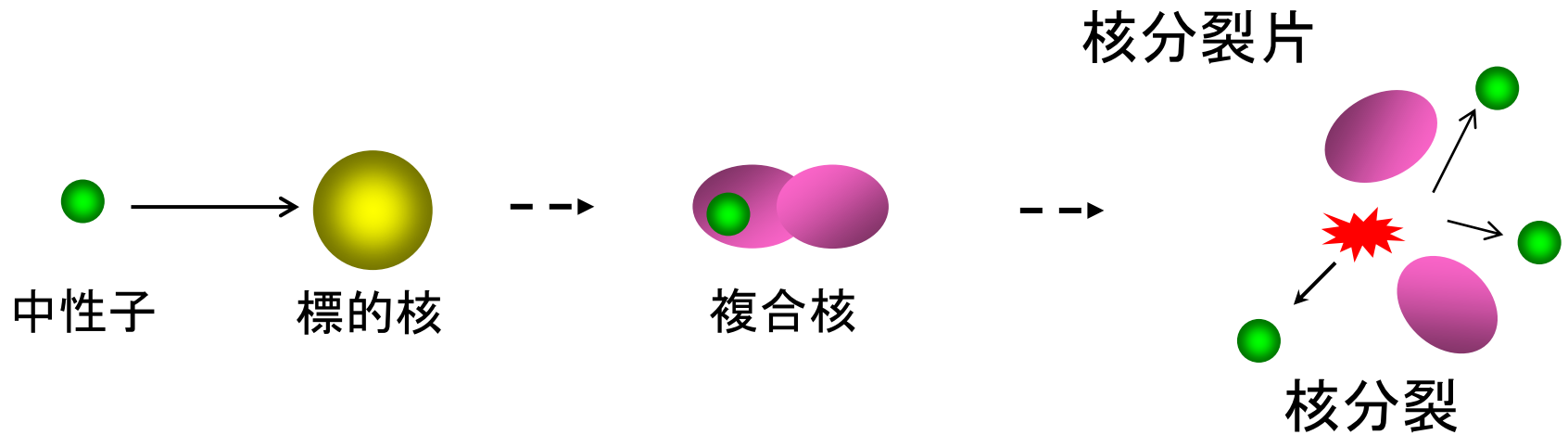
・反応度 ρ は、中性子増倍率 k の1.0からのずれの割合（体系が臨界状態からどれくらい離れているか）を示すパラメータであり、 k を用いて以下のように定義される。

$$\rho = 1 - \frac{1}{k} = \frac{k - 1}{k}$$

・反応度 ρ の単位は $[dk/k]$ である（ $[\Delta k/k]$ と表記する場合もある）。pcm ($10^{-5} dk/k$) を使う場合もある。

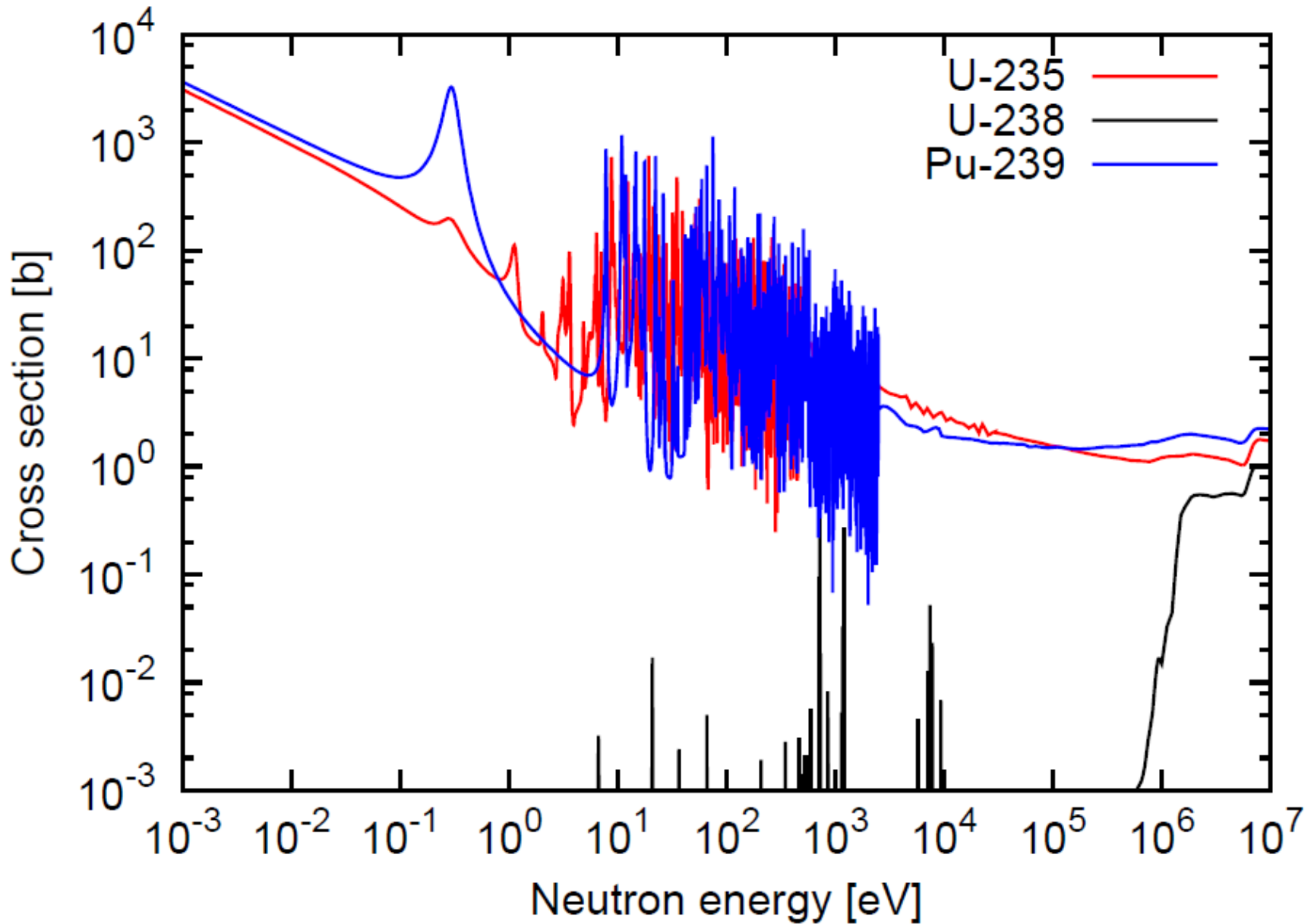
・臨界のときは $\rho = 0$ 、超臨界では $\rho > 0$ 、未臨界では $\rho < 0$ である。

核分裂反応

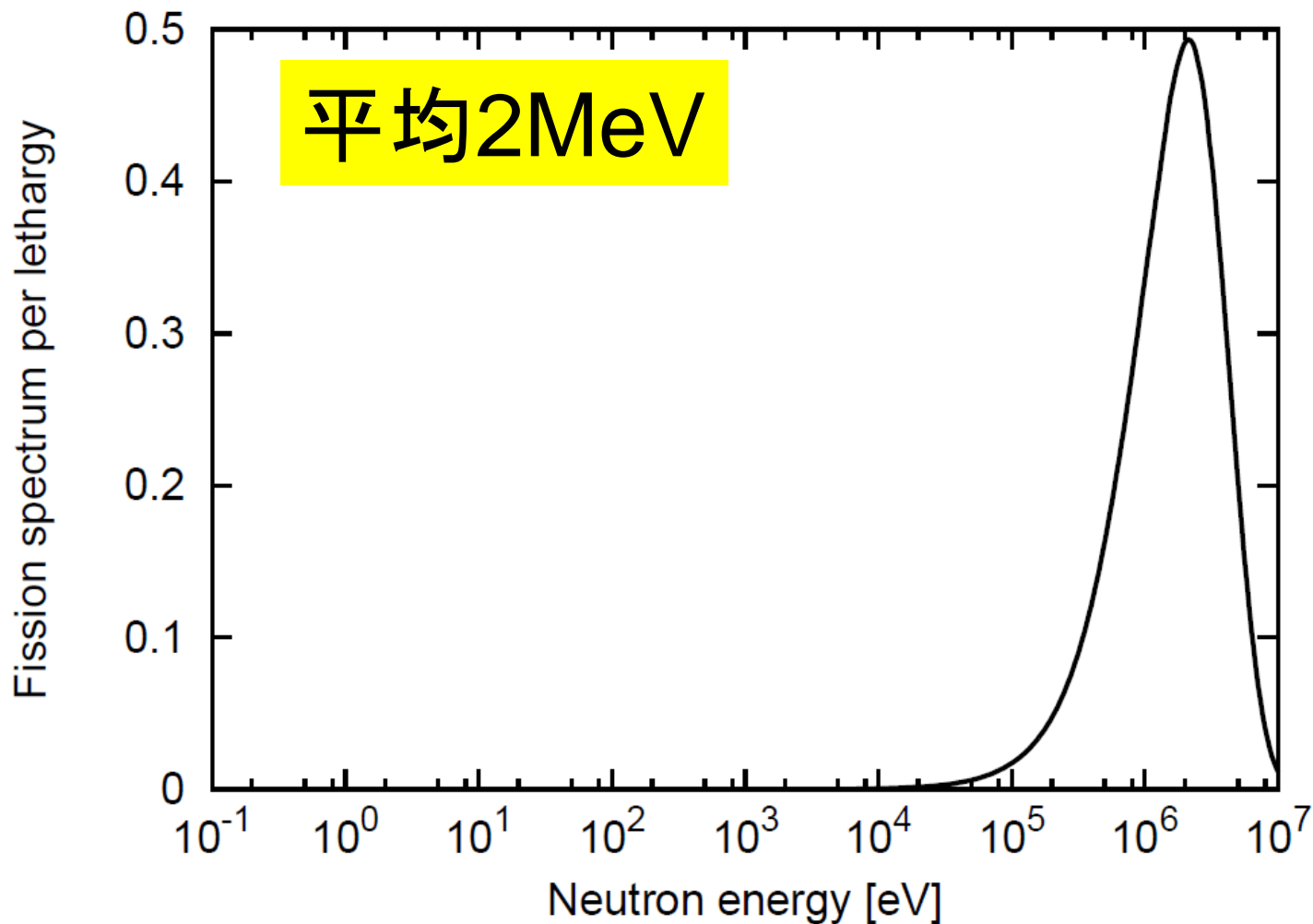
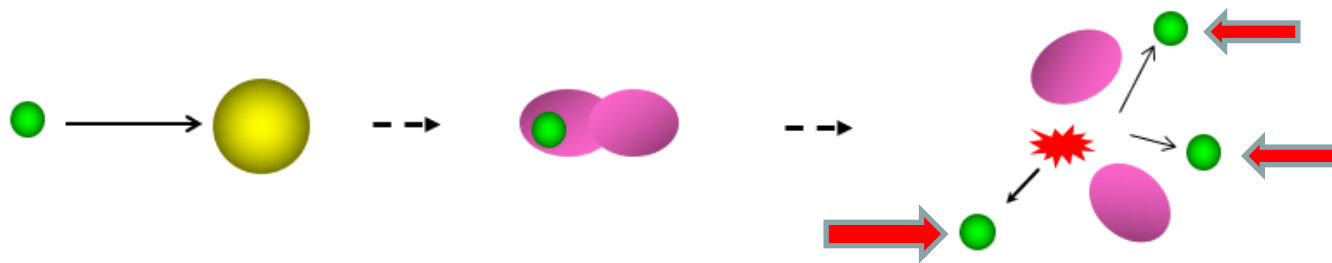


反応の「起こりやすさ」は、標的となる原子核の種類、および中性子の運動エネルギーに強く依存する。

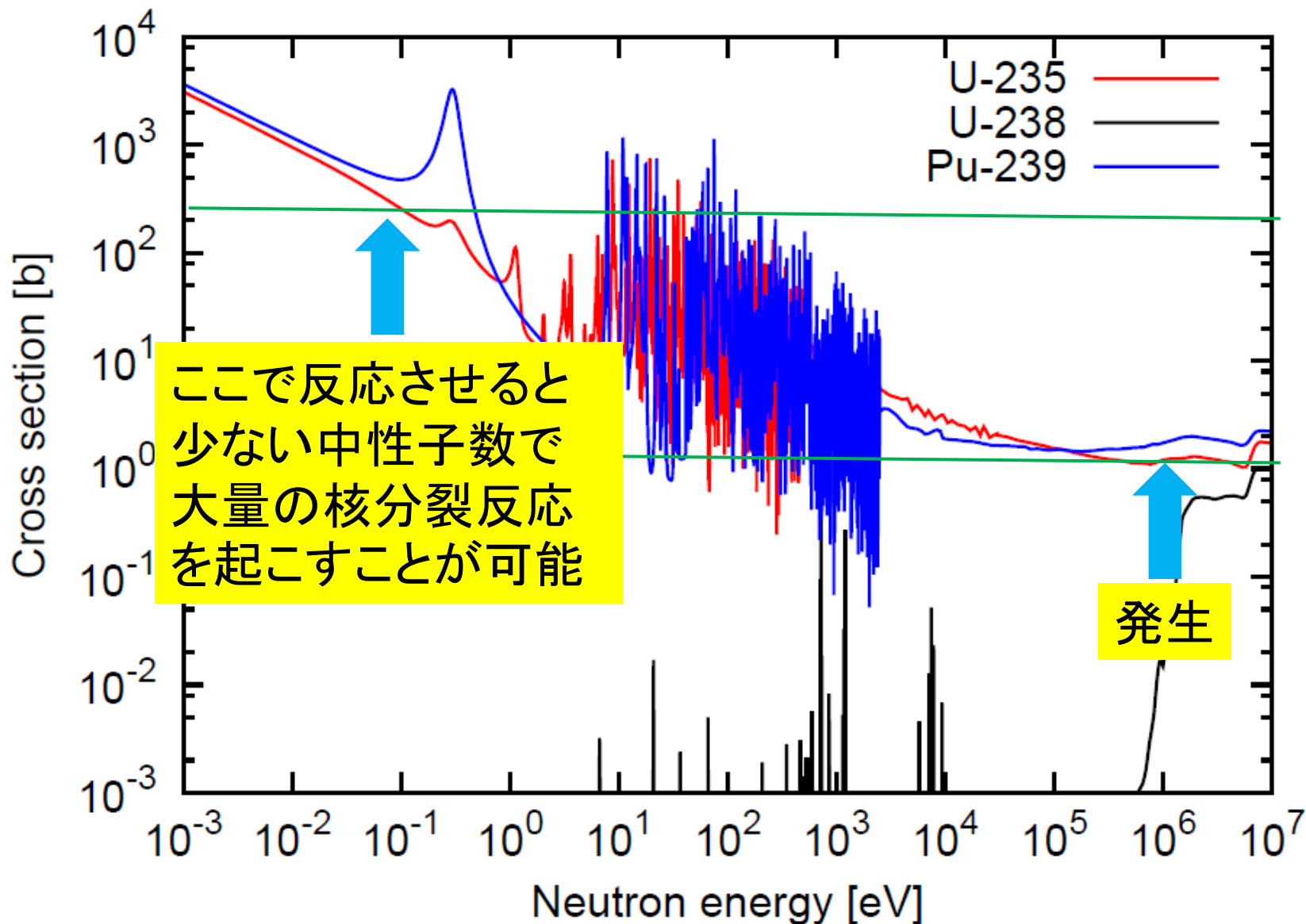
核分裂反応の起こりやすさ:核分裂断面積



核分裂反応で発生する中性子のエネルギー



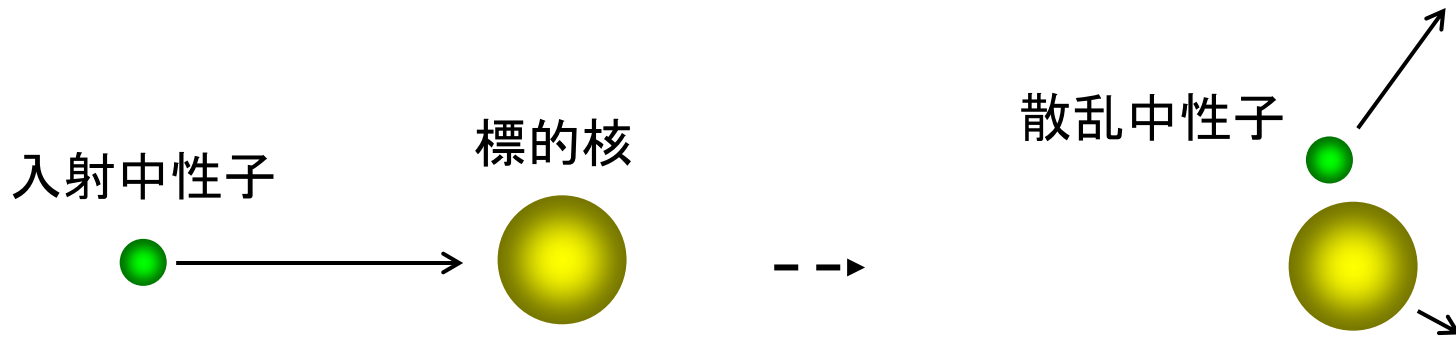
核分裂反応の起こりやすさ: 核分裂断面積



核分裂で生まれた“高速な”中性子の速度を落としてやるとよい。

中性子のエネルギーを低くする：減速

中性子と原子核の弾性散乱反応を利用



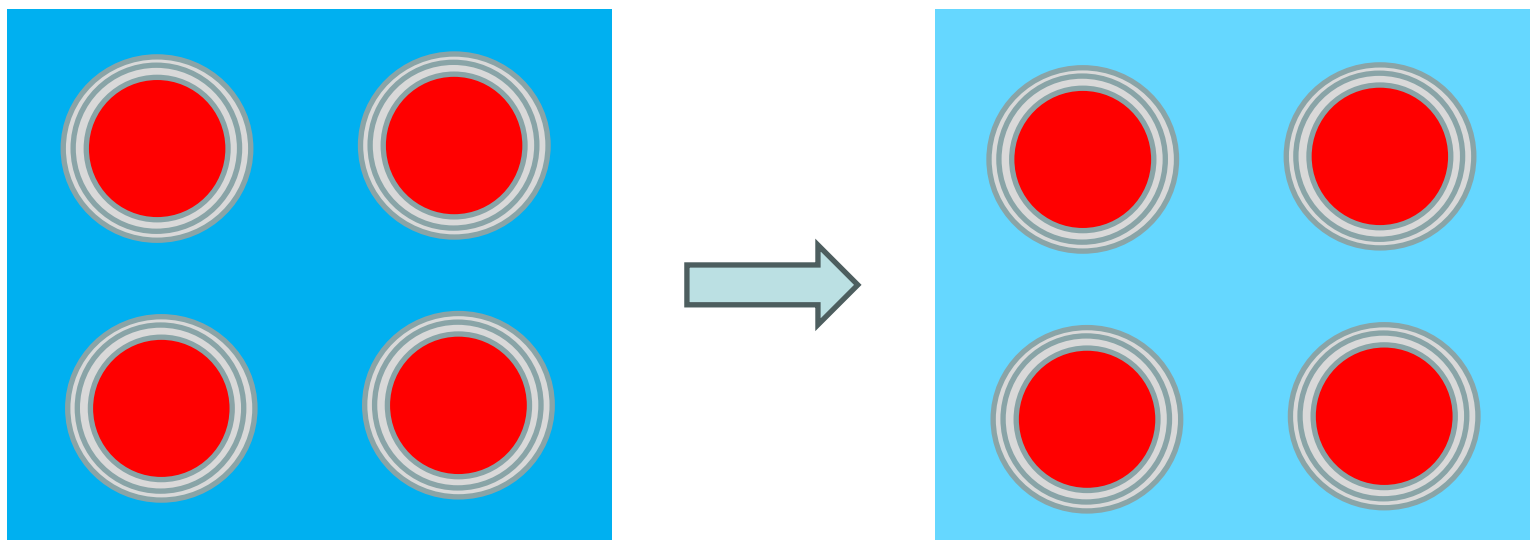
標的核に運動エネルギーの一部が付与されるため、散乱中性子のエネルギーが低下

中性子と同程度の重さの原子核(すなわち軽い原子核)を使えば、少ない衝突数で、中性子のエネルギーを低くすることが出来る → 水が有効

水による中性子の減速

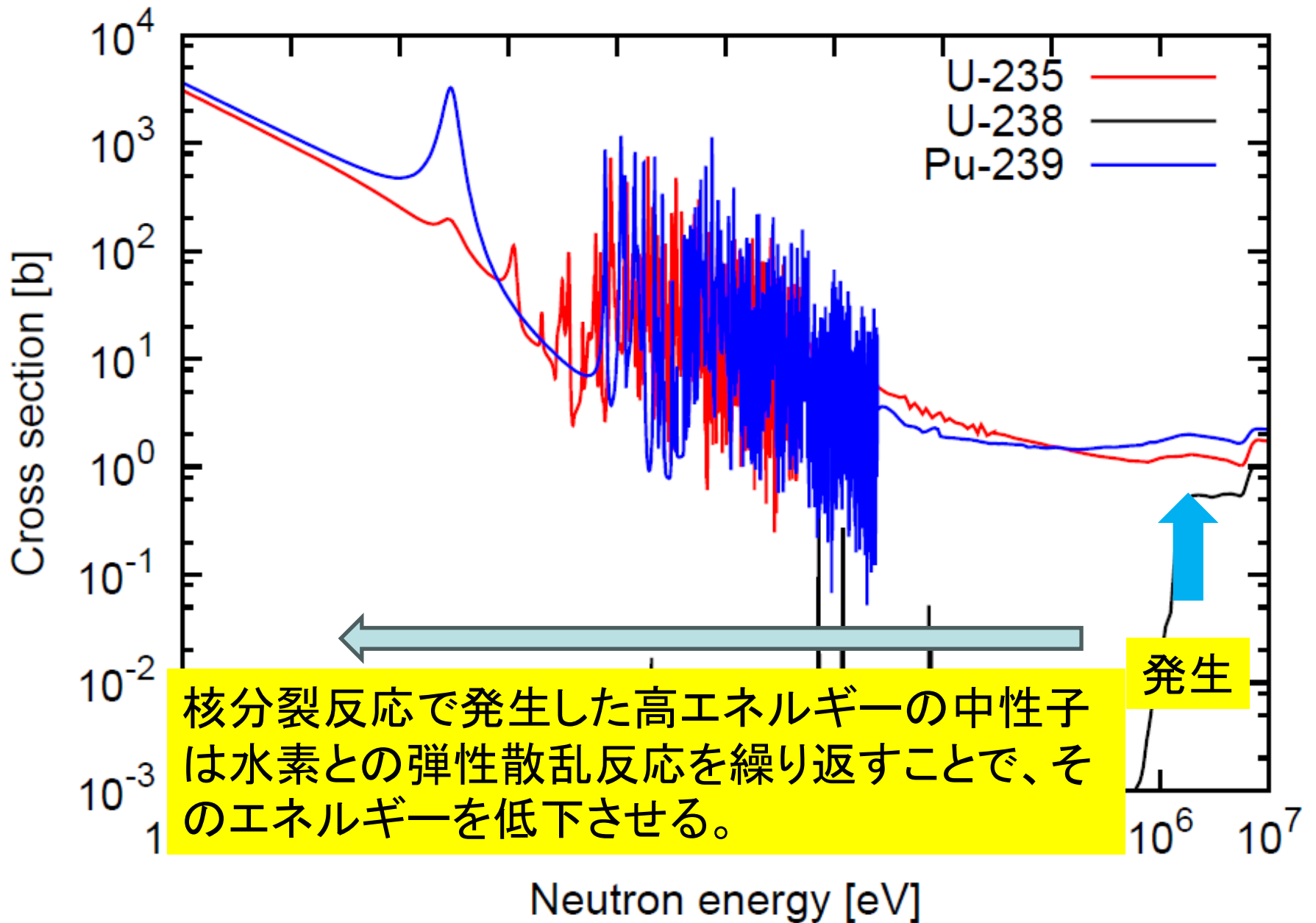
減速材(水):

核分裂で発生した中性子のエネルギーを低下させる役割を有する。

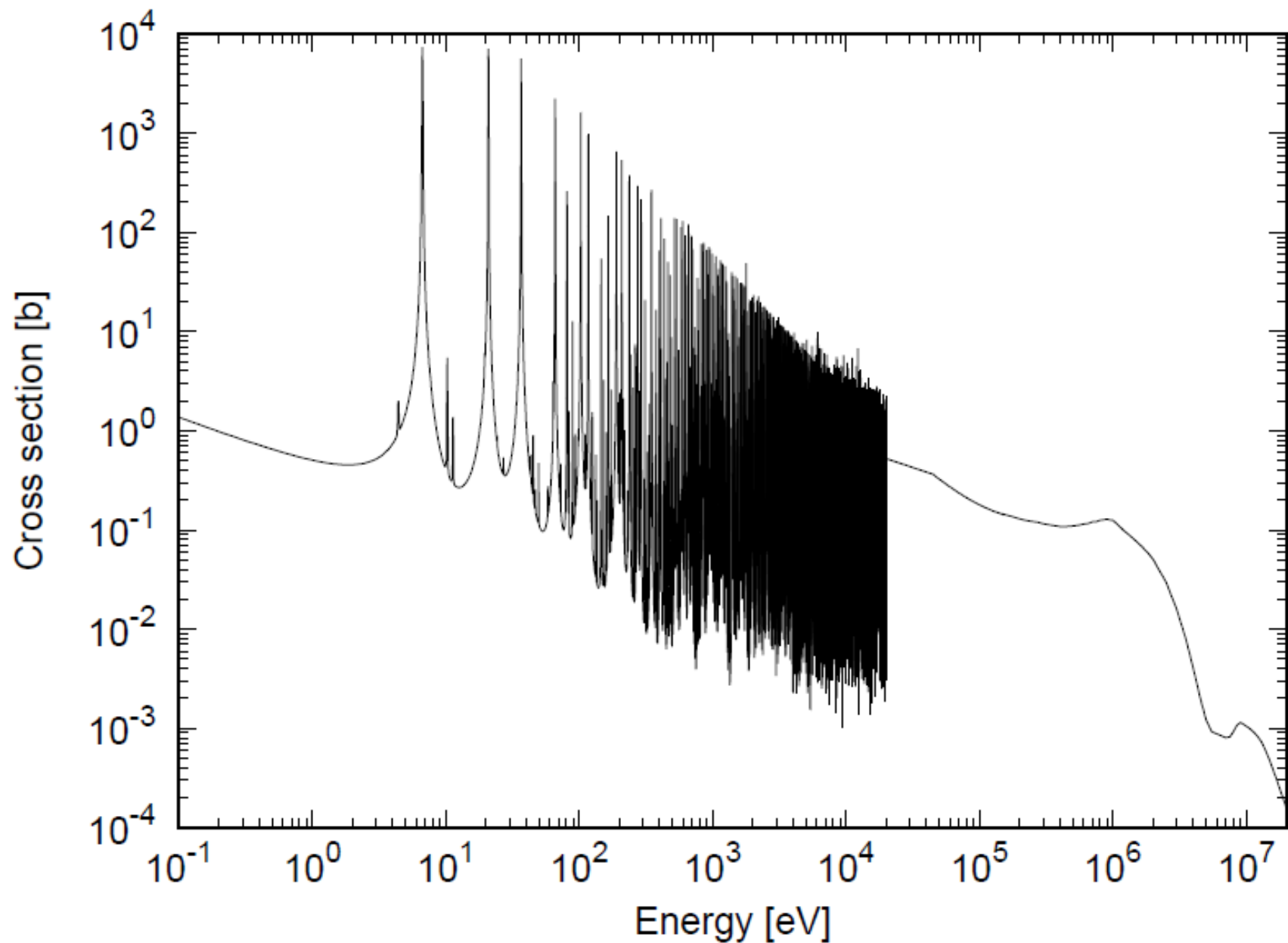


冷却材の温度が増加すると、冷却材の密度が低下するため、中性子の減速効果が低下し、核分裂連鎖反応が抑制される(反応度が低下する)。

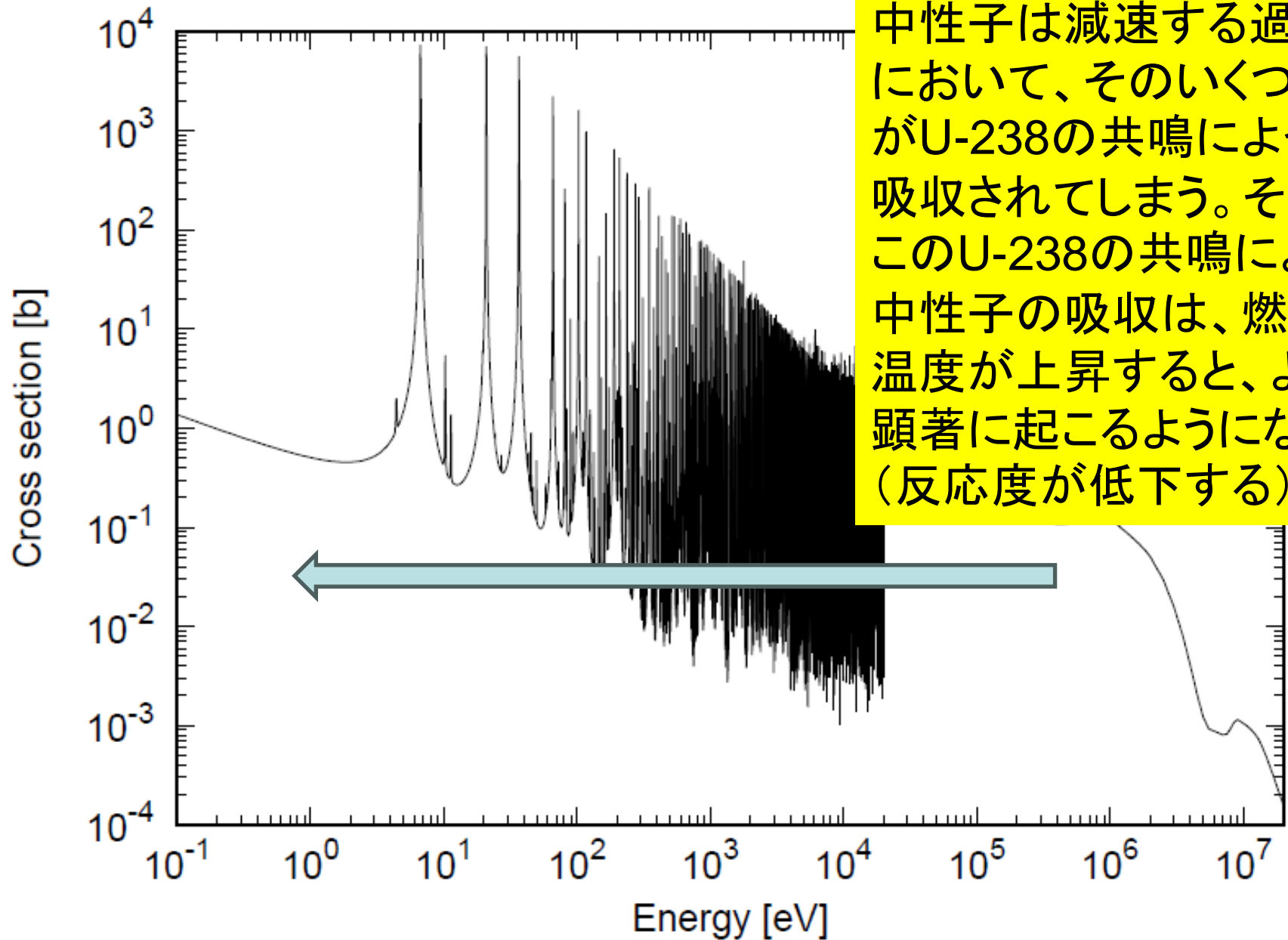
核分裂反応の起こりやすさ:核分裂断面積



ウラン238の中性子吸収断面積

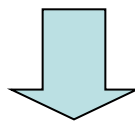


ウラン238による共鳴吸収

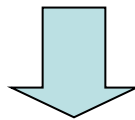


反応度フィードバック

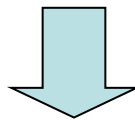
原子炉出力の変化



燃料温度、冷却材温度などの変化



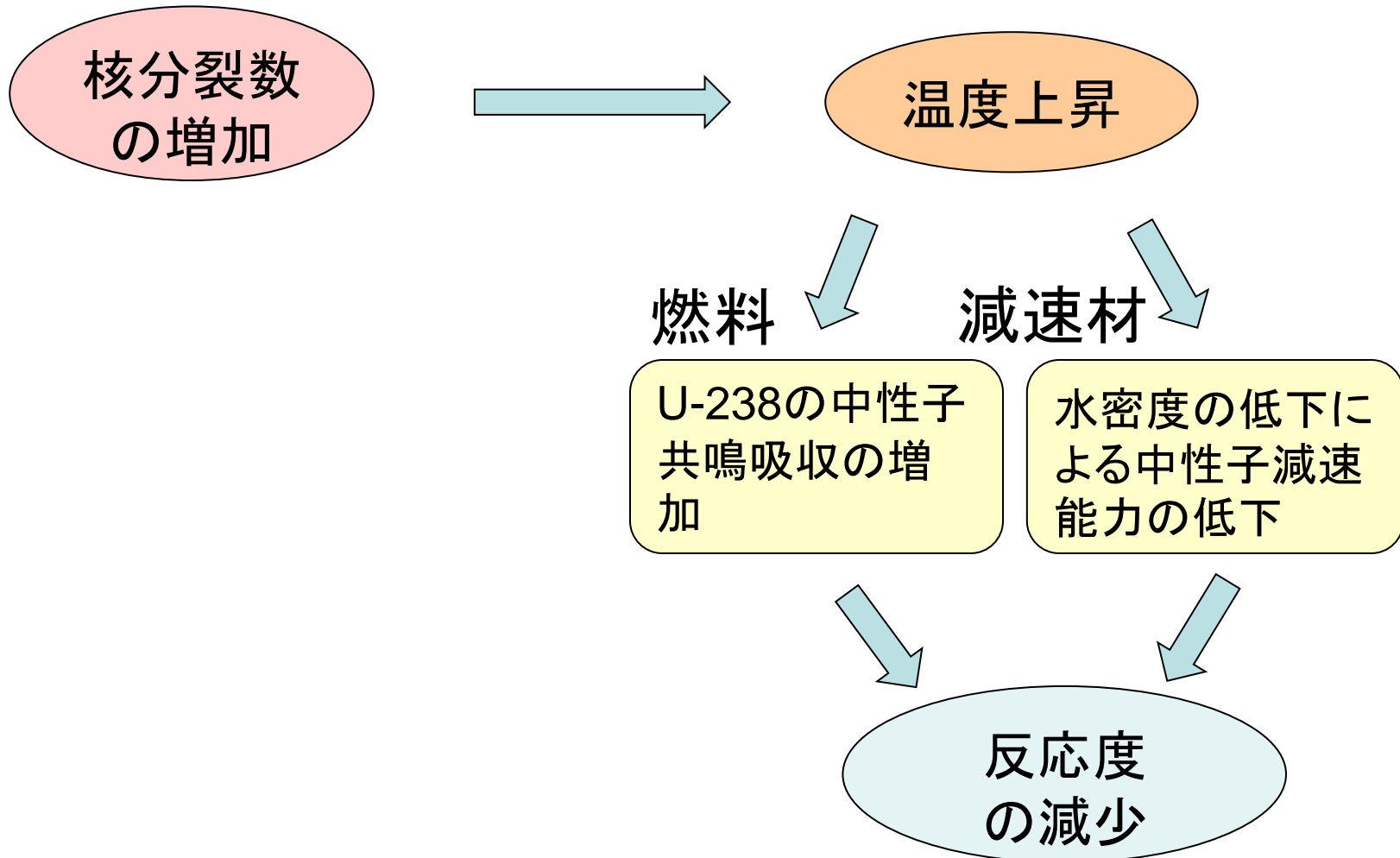
- U-238の共鳴吸収の変化
- 冷却材密度の変化による中性子の減速効果の変化
- ...



反応度の変化

原子炉の自己制御性

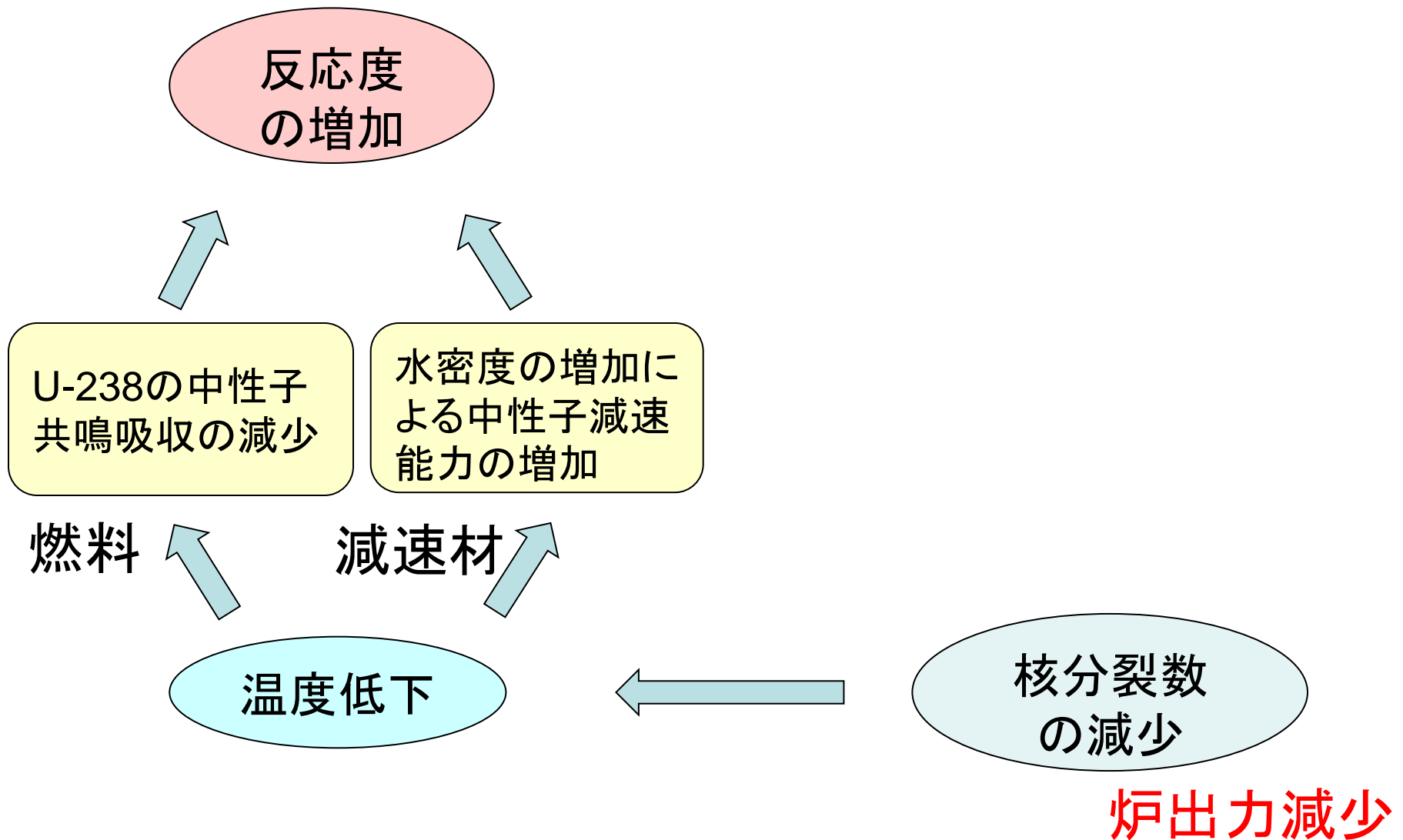
炉出力増加



炉出力増加が抑制

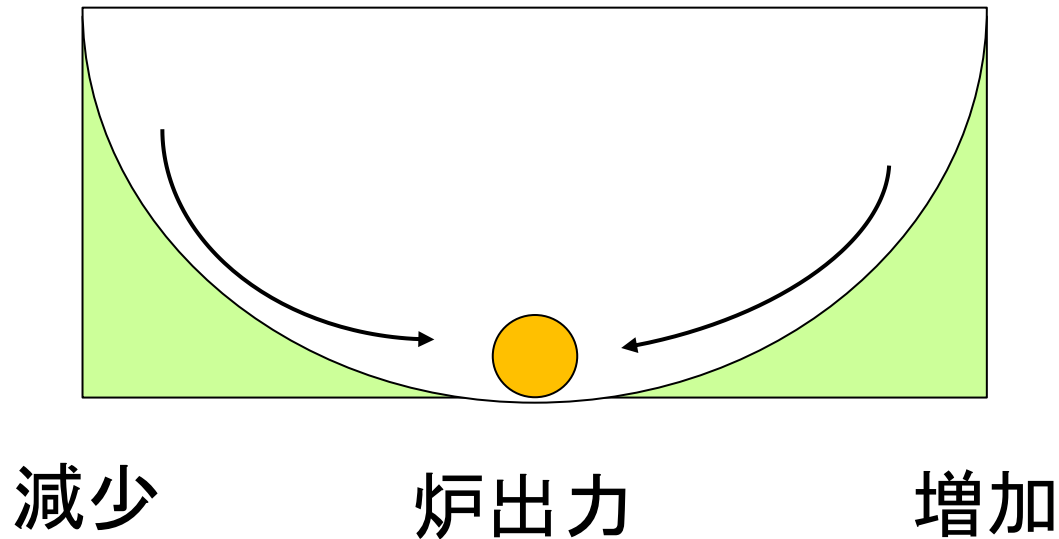
原子炉の自己制御性

炉出力減少が抑制



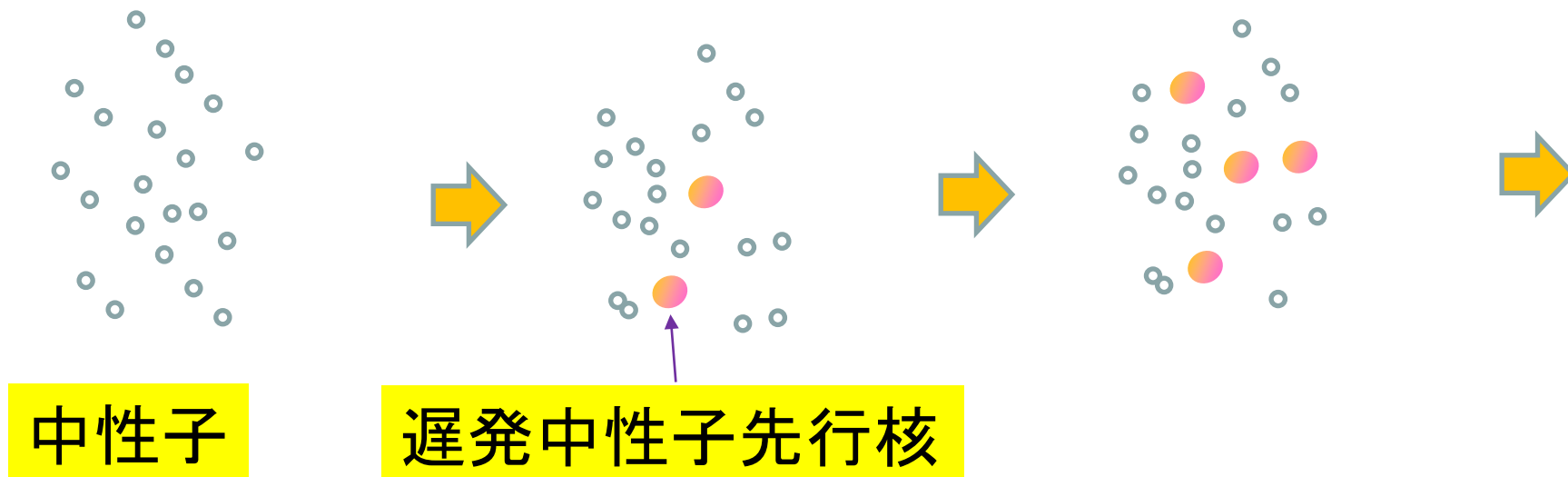
原子炉の自己制御性

原子炉は、燃料温度や冷却材温度などの負の反応度フィードバックにより、出力の変化を抑制する特性を有する。



原子炉の過渡応答

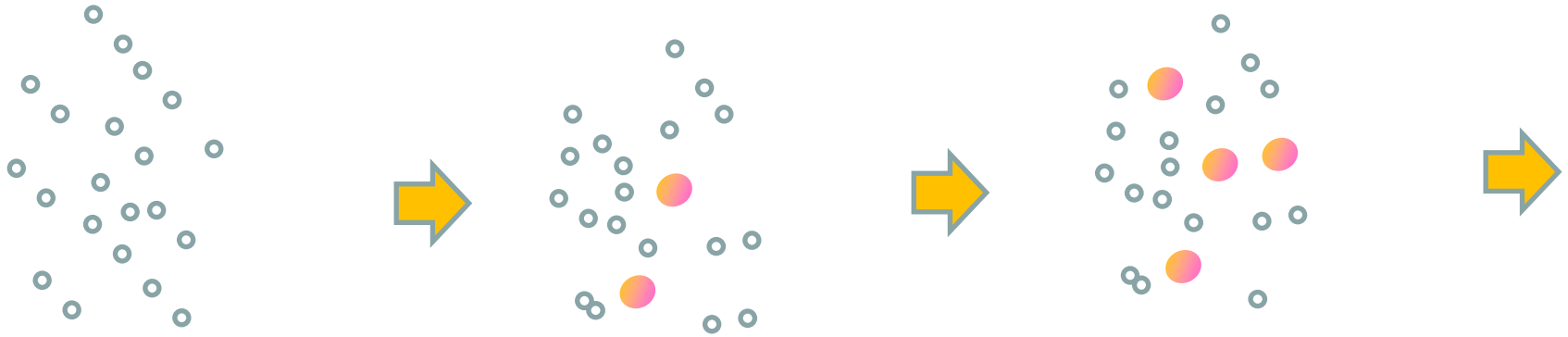
遅発中性子



1世代の時間が経過した後、中性子数は中性子増倍率 k 倍となる。ただしそのうち割合 β は遅発中性子先行核である。従って、即発中性子の個数は1世代の時間が経過した後は $(1 - \beta)k$ 倍となる。

* β はウラン235の熱中性子による核分裂では0.007程度

即発中性子のみの連鎖反応



中性子数： N_0

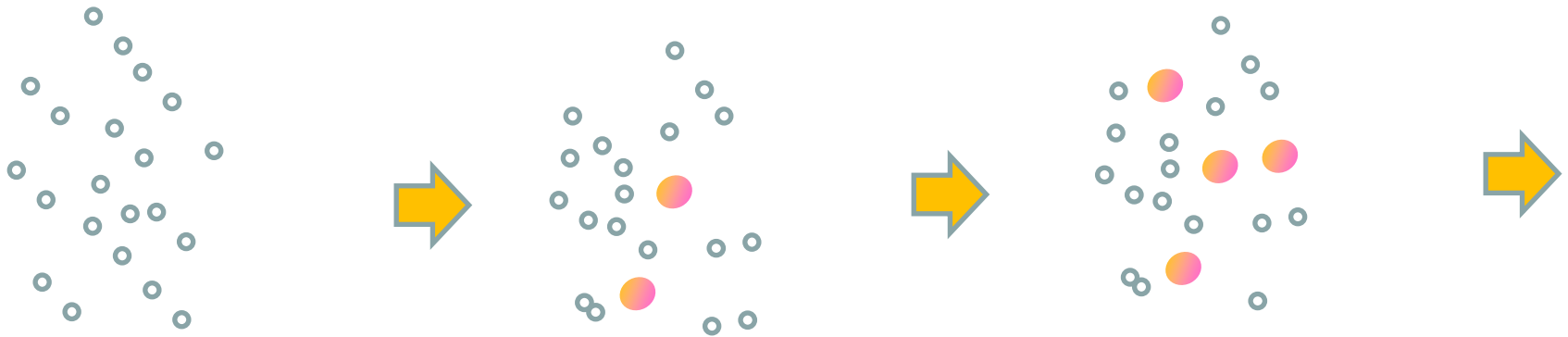
$$(1 - \beta)kN_0 \\ = k_p N_0$$

$$(1 - \beta)^2 k^2 N_0 \\ = k_p^2 N_0$$

即発中性子のみの中性子増倍率 $k_p = (1 - \beta)k$ を定義すると、
臨界状態($k = 1$)のときは $k_p = (1 - \beta) < 1$ であることから、
即発中性子のみでは連鎖反応は持続しないことが分かる。

* β はウラン235の熱中性子による核分裂では0.007程度

即発中性子のみの連鎖反応



中性子数: N_0

$$(1 - \beta)kN_0 \\ = k_p N_0$$

$$(1 - \beta)^2 k^2 N_0 \\ = k_p^2 N_0$$

一方、 $k_p = (1 - \beta)k > 1$ 、すなわち $k > \frac{1}{1 - \beta} \approx 1 + \beta$ のときには、即発中性子のみに連鎖反応が持続し、中性子数は急激に増加する。

遅発臨界と即発臨界

即発臨界状態

$$k > 1 + \beta$$

中性子数は急激に増加

$$k = 1 + \beta$$

遅発臨界状態

遅発中性子によって
反応が持続

$$k = 1$$

未臨界状態

$$k < 1$$

遅発臨界と即発臨界

即発臨界状態

$$\rho > \beta$$

中性子数は急激に増加

$$\rho = \beta$$

遅発臨界状態

遅発中性子によって
反応が持続

$$\rho = 0$$

未臨界状態

$$\rho < 0$$

遅発臨界と即発臨界

即発臨界状態

$$\rho > \beta$$

制御不能

$$\rho = \beta$$

遅発臨界状態

制御可能

$$\rho = 0$$

未臨界状態

$$\rho < 0$$

遅発臨界と即発臨界

反応度 ρ を遅発中性子割合 β で割ったものは「ドル単位の反応度」と定義される。

即発臨界状態

$$\rho > 1 \$$$

制御不能

$$\rho = 1 \$$$

遅発臨界状態

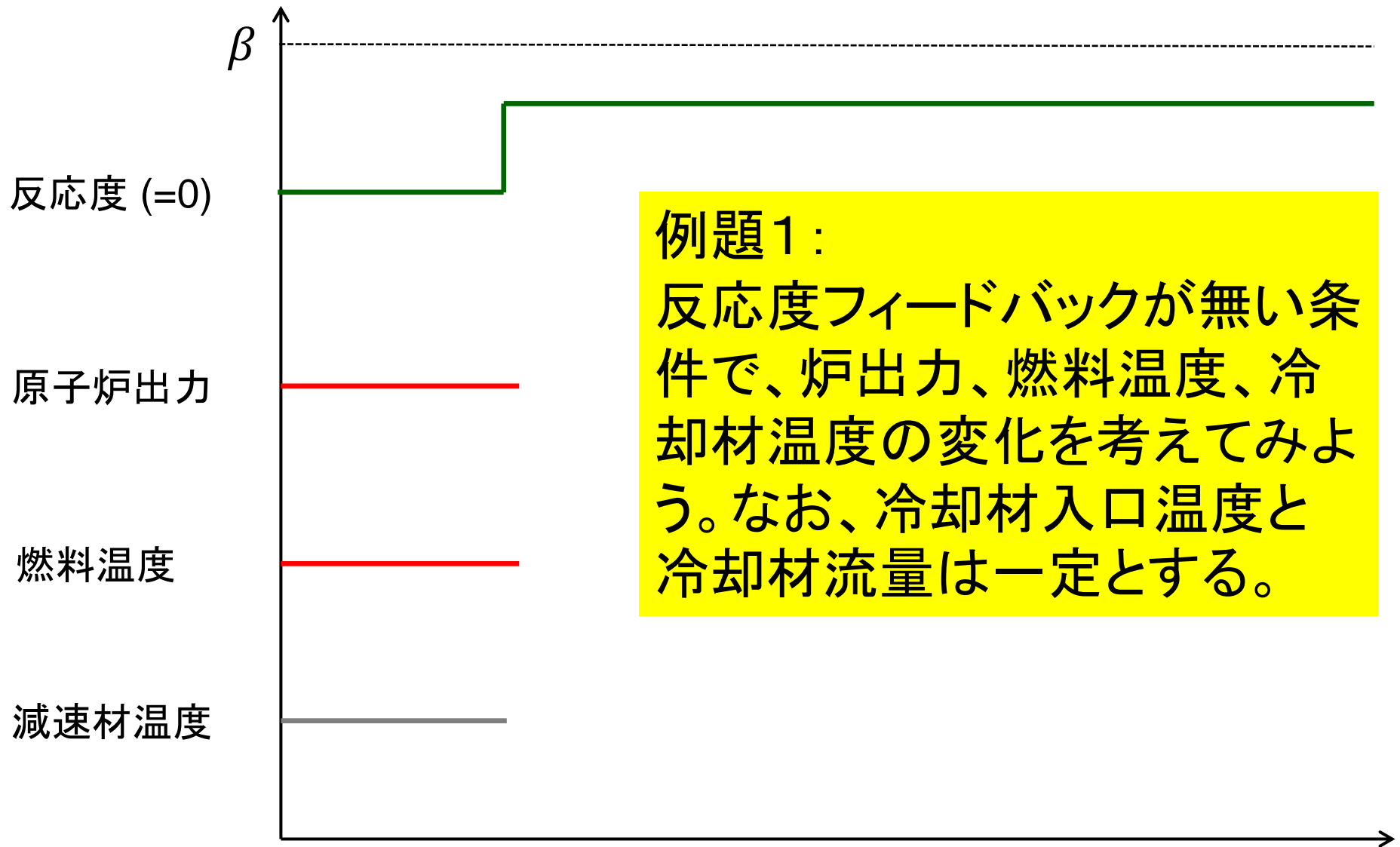
制御可能

$$\rho = 0 \$$$

未臨界状態

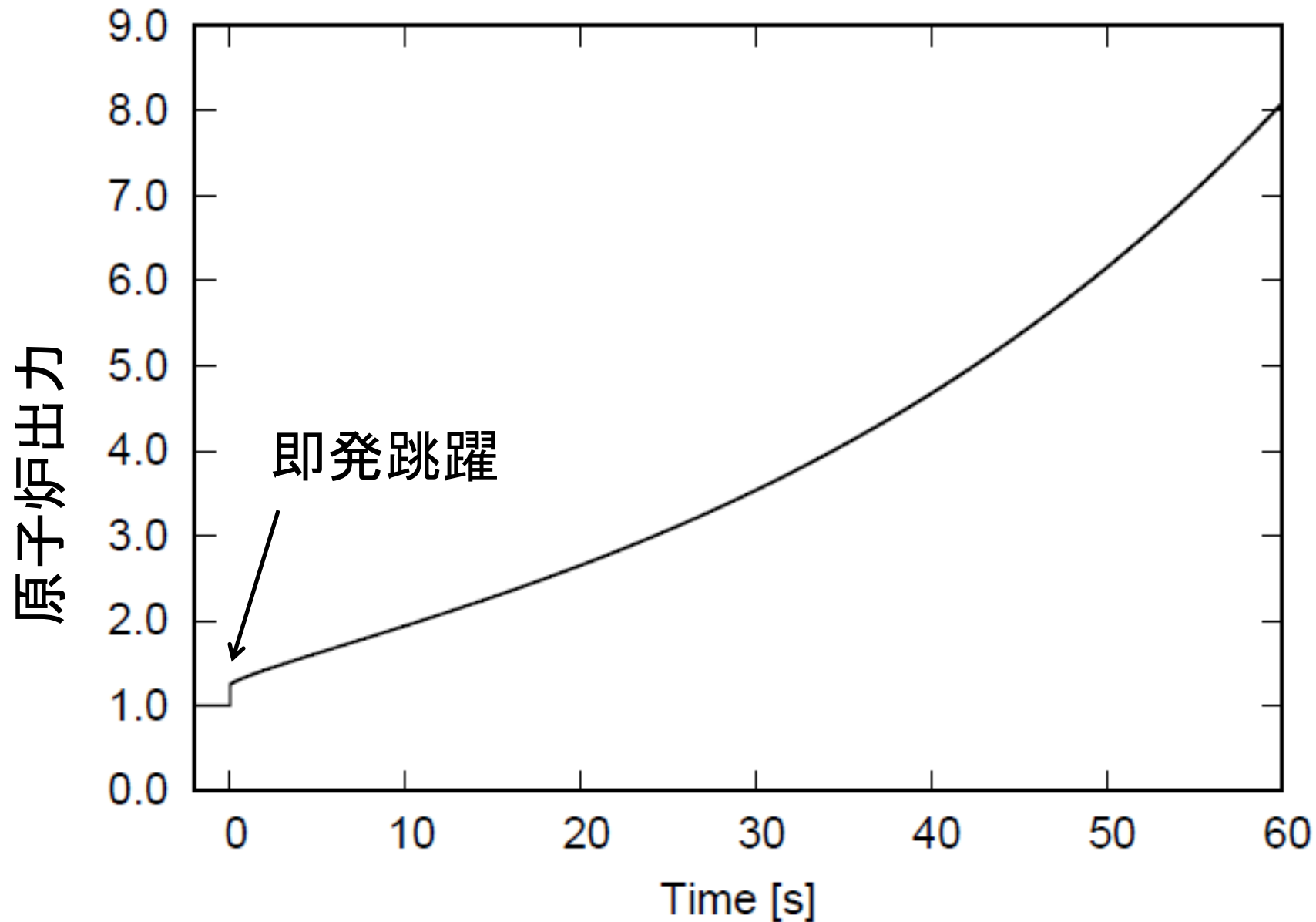
$$\rho < 0 \$$$

原子炉の過渡応答(フィードバック無し)

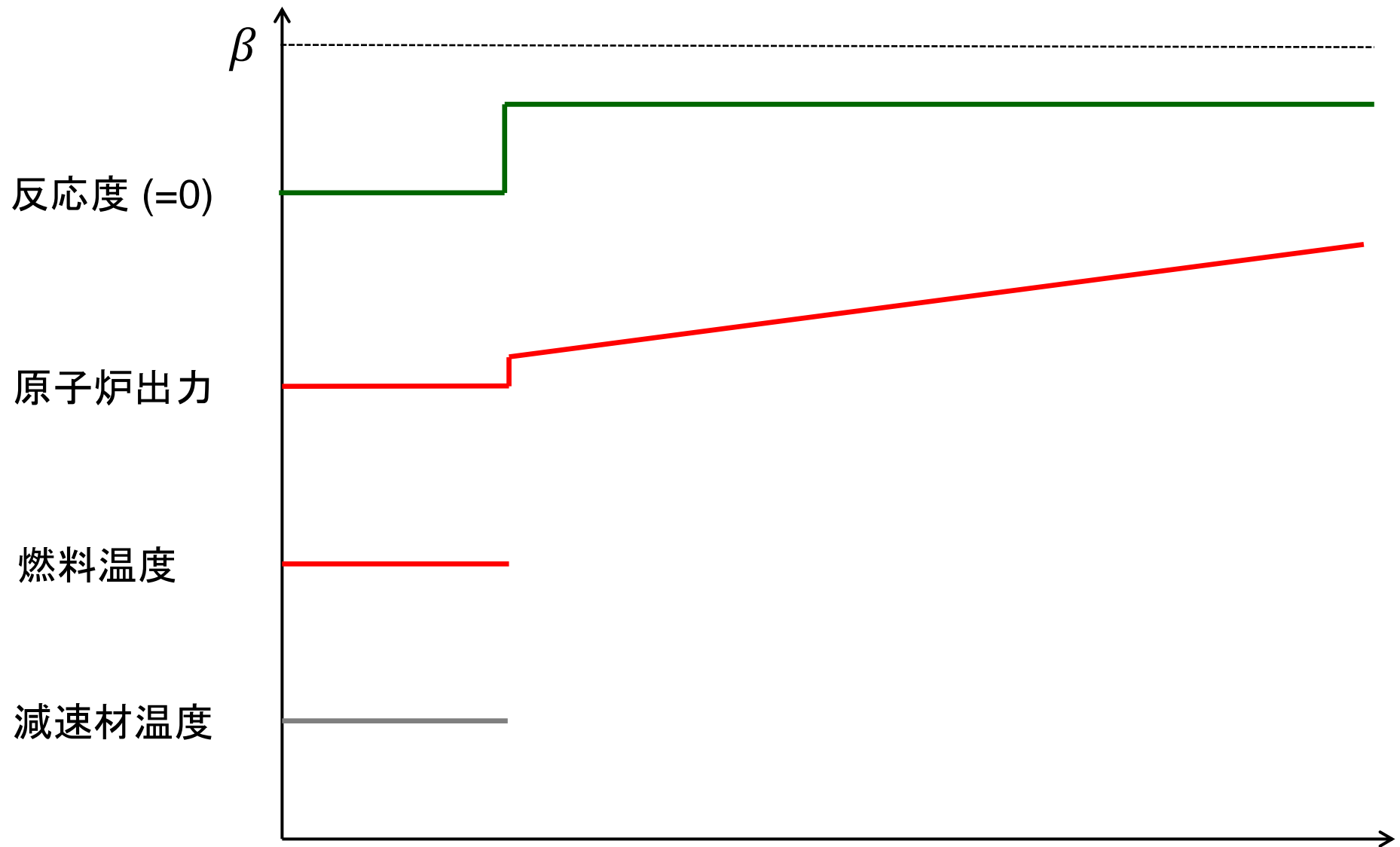


例題1:
反応度フィードバックが無い条件で、炉出力、燃料温度、冷却材温度の変化を考えてみよう。なお、冷却材入口温度と冷却材流量は一定とする。

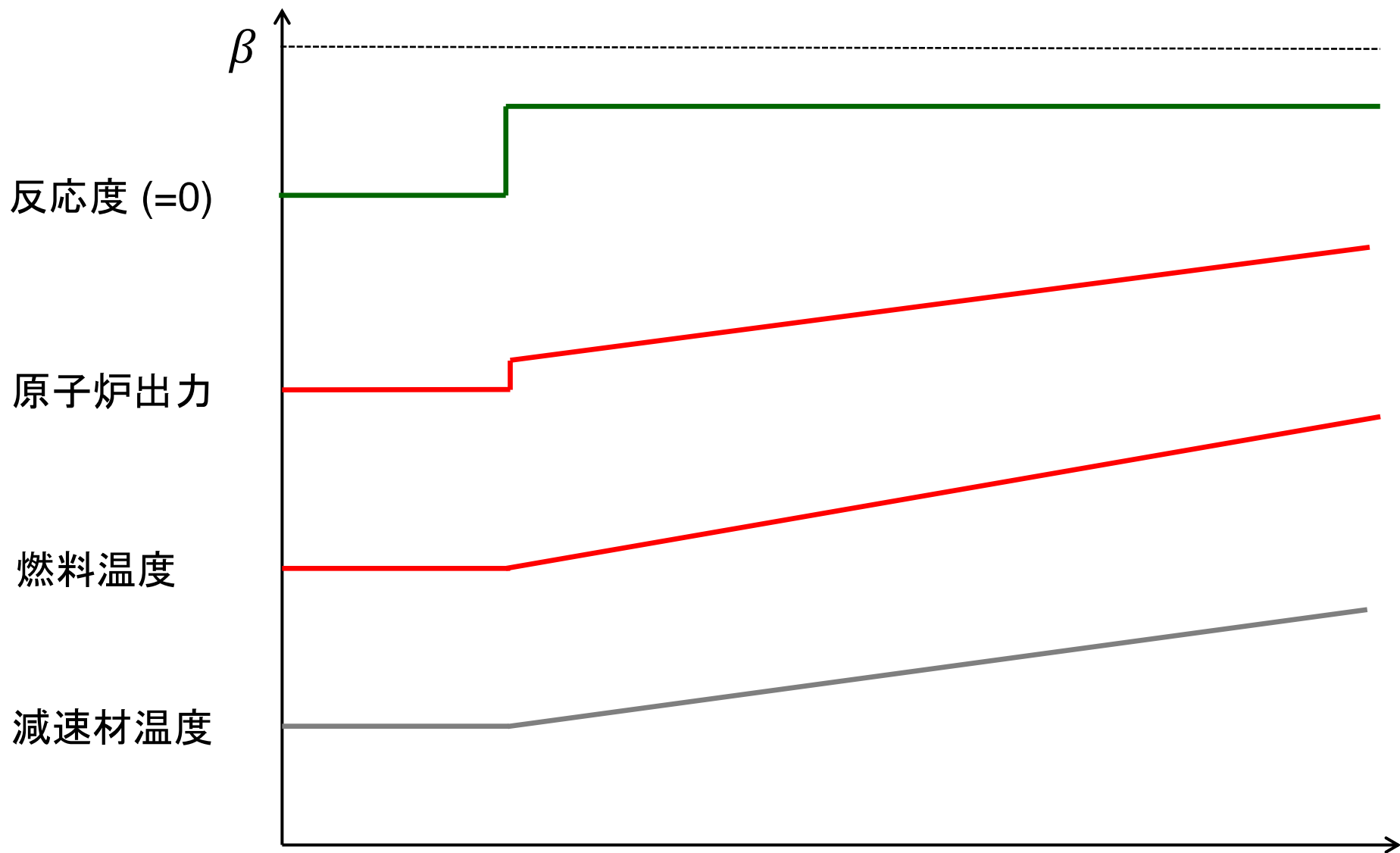
原子炉の過渡応答(フィードバック無し)



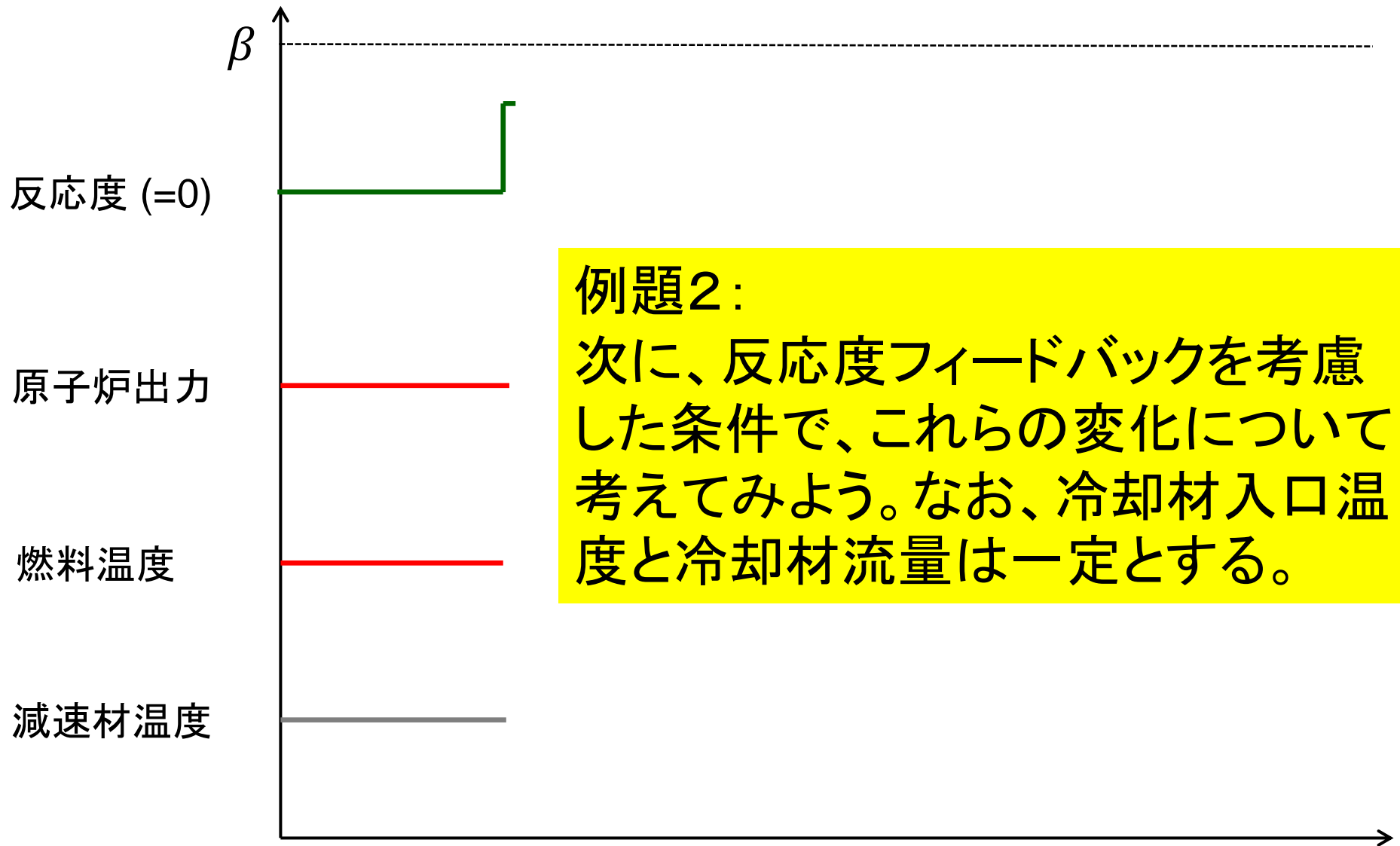
原子炉の過渡応答(フィードバック無し)



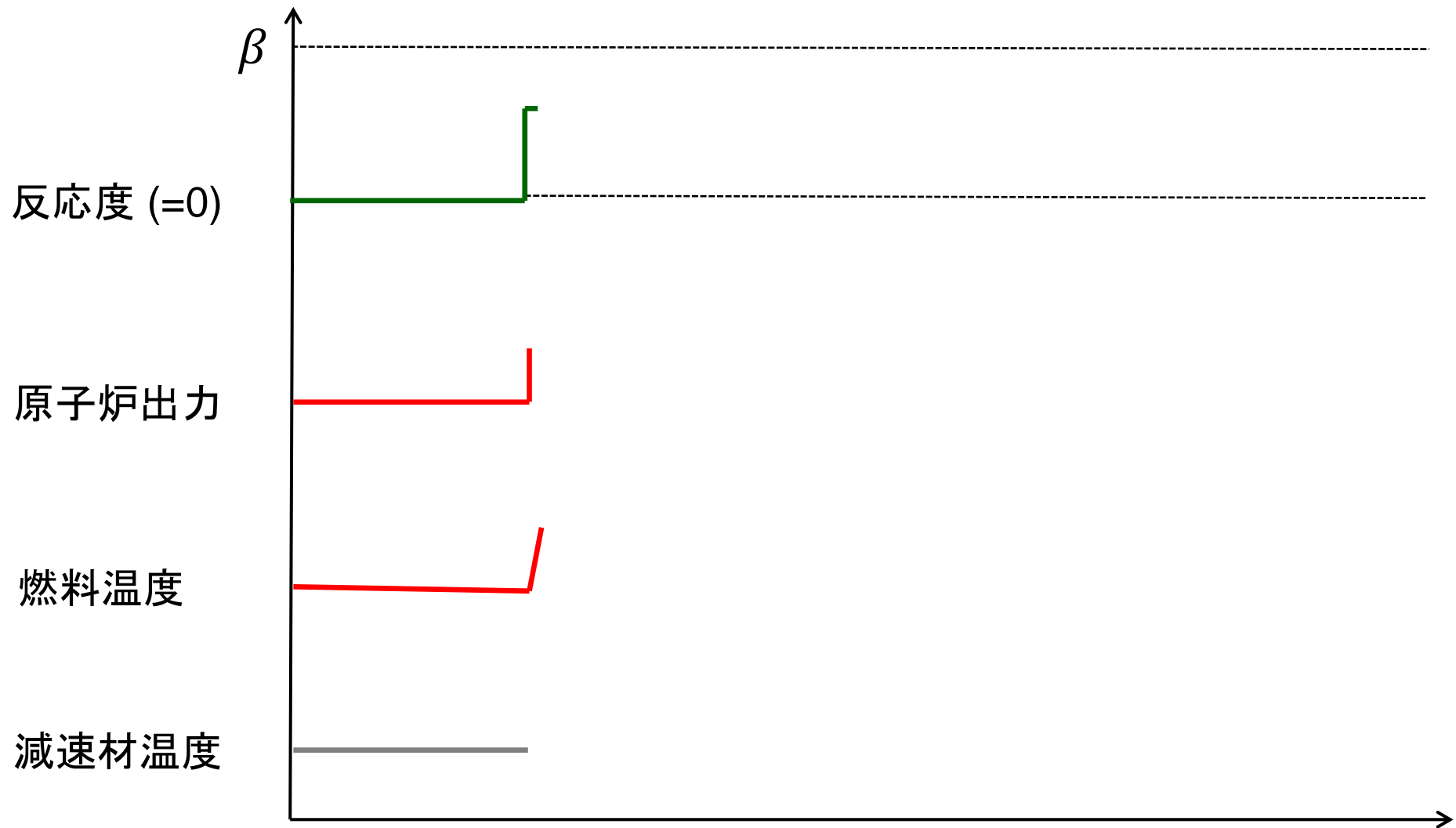
原子炉の過渡応答(フィードバック無し)



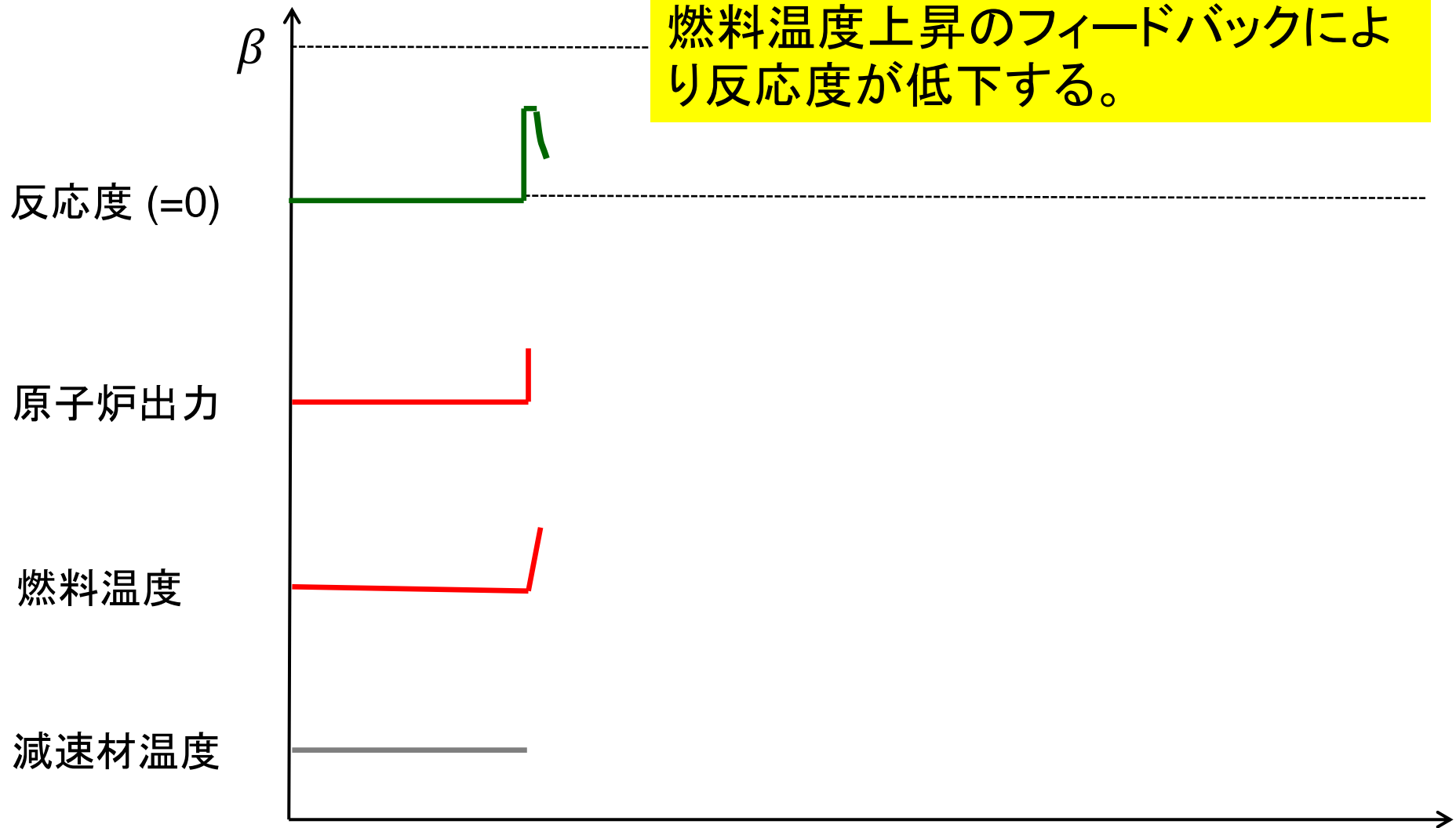
原子炉の過渡応答(フィードバック有り)



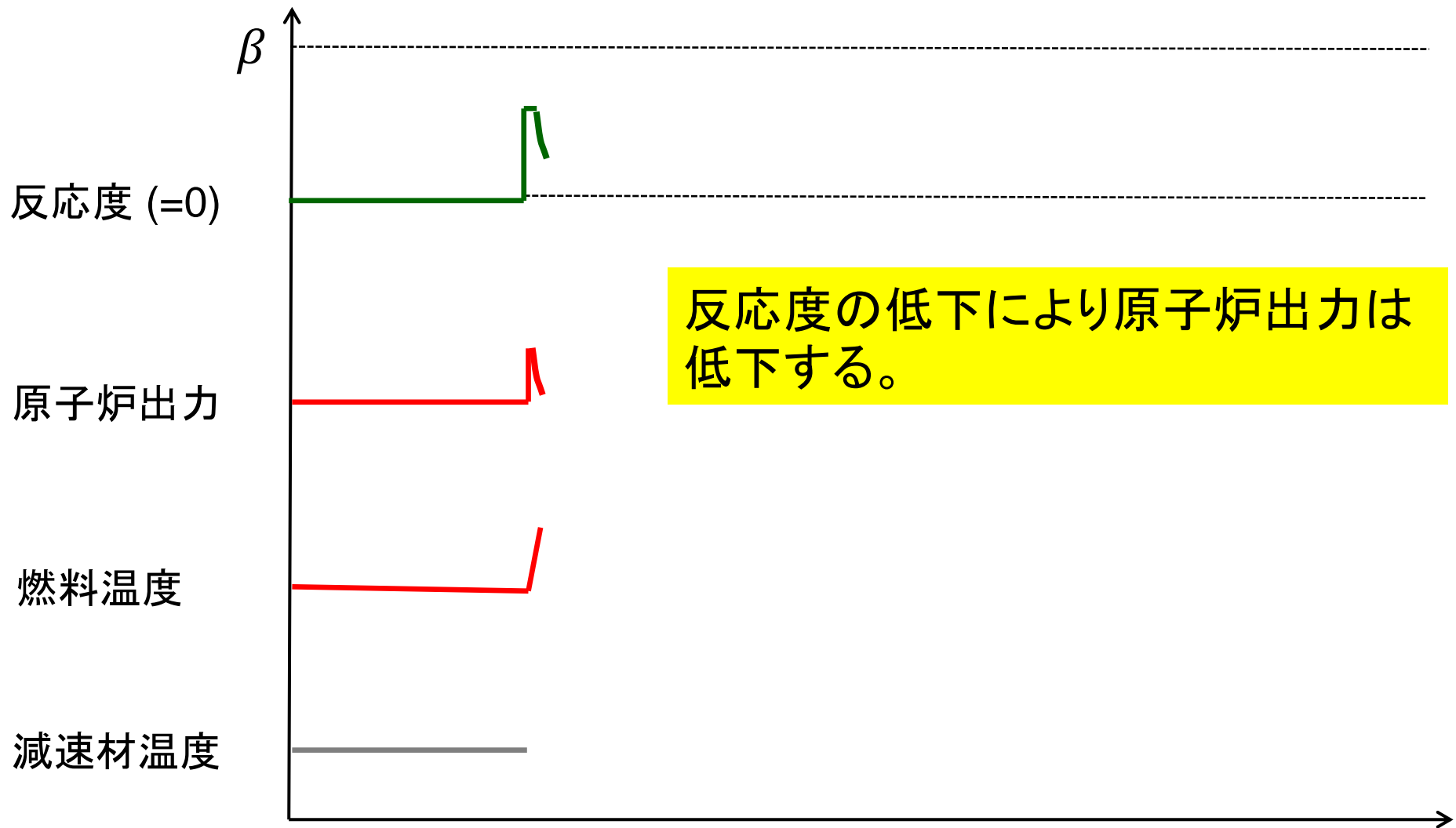
原子炉の過渡応答(フィードバック有り)



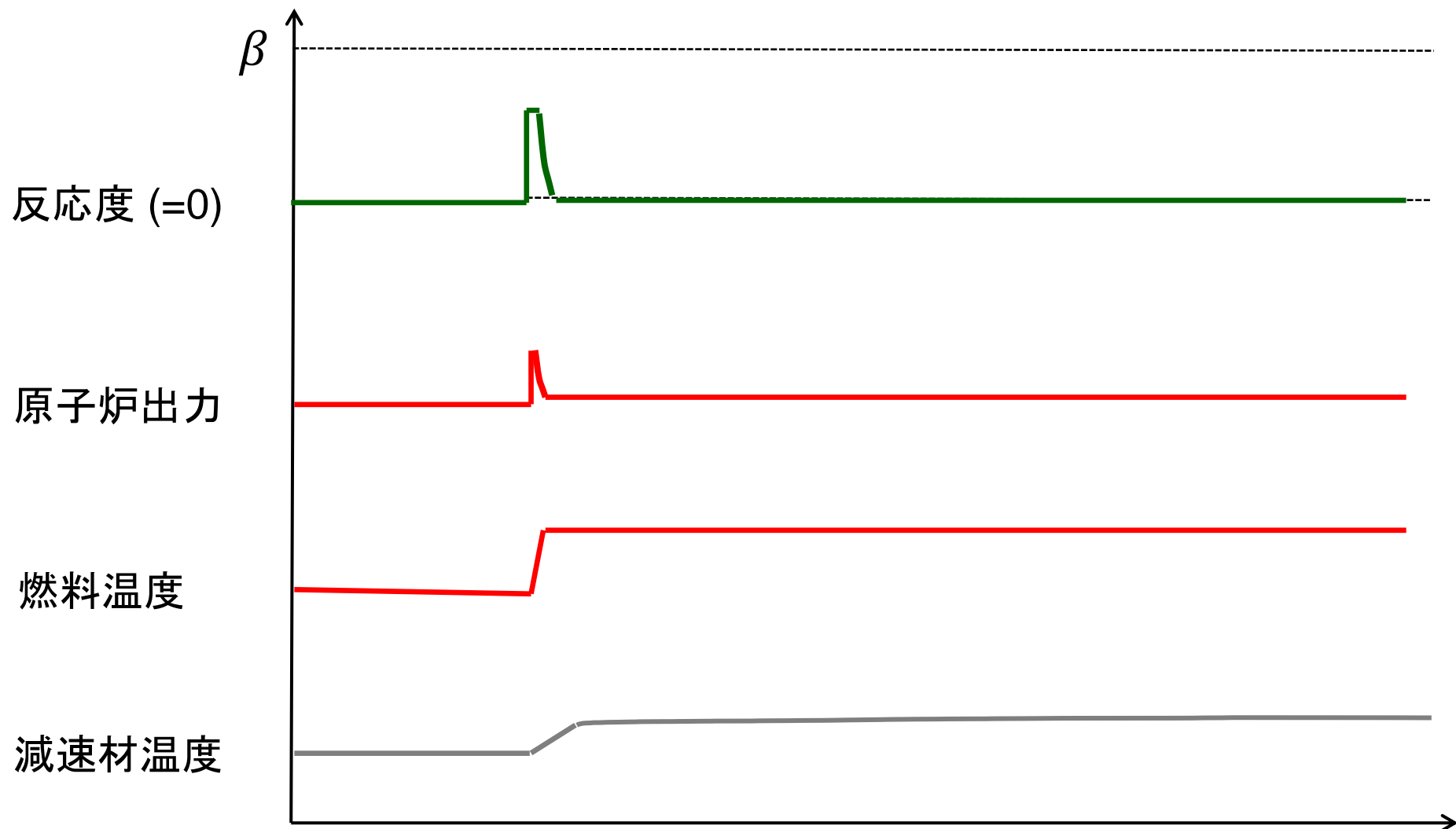
原子炉の過渡応答(フィードバック有り)



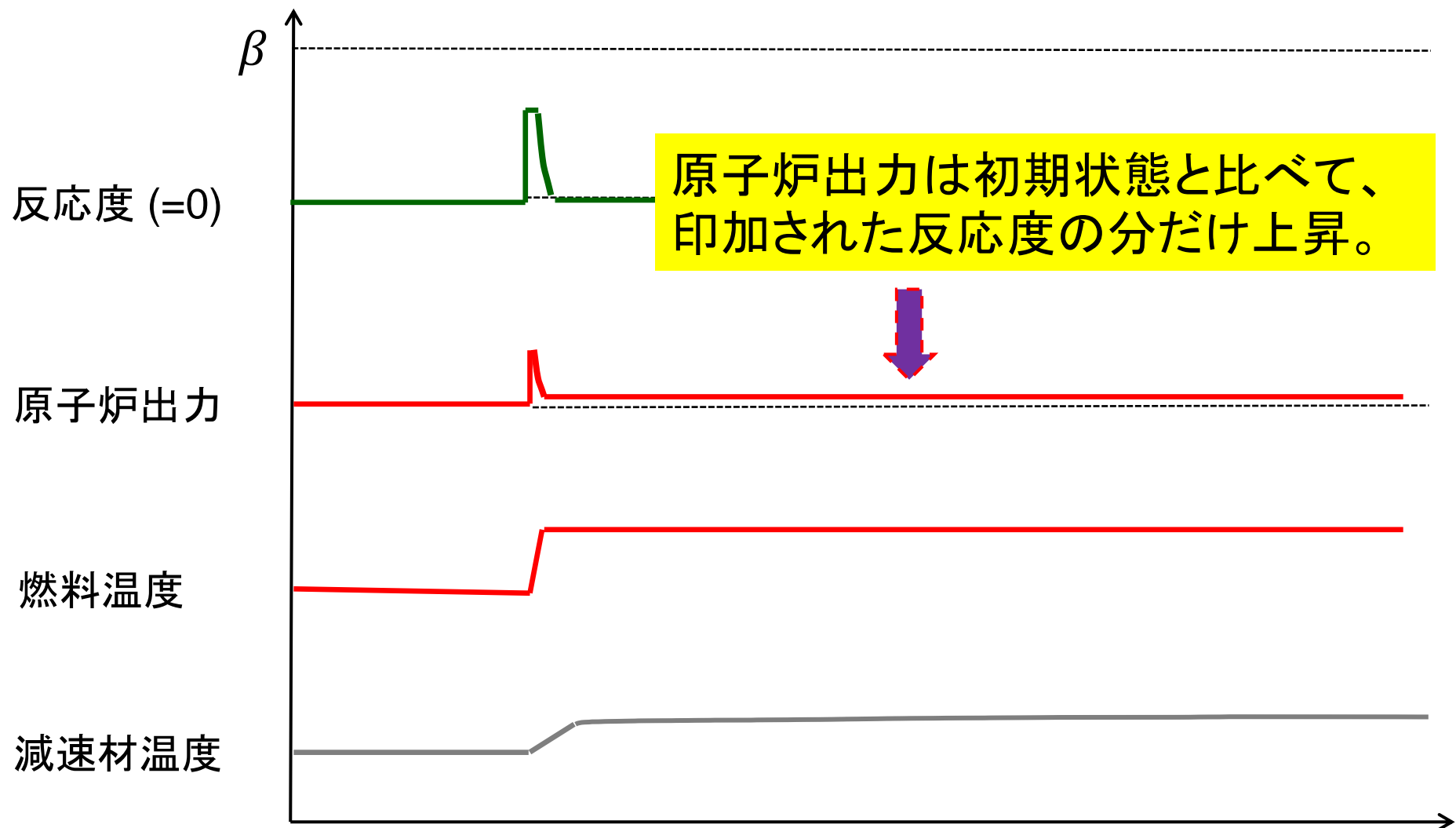
原子炉の過渡応答(フィードバック有り)



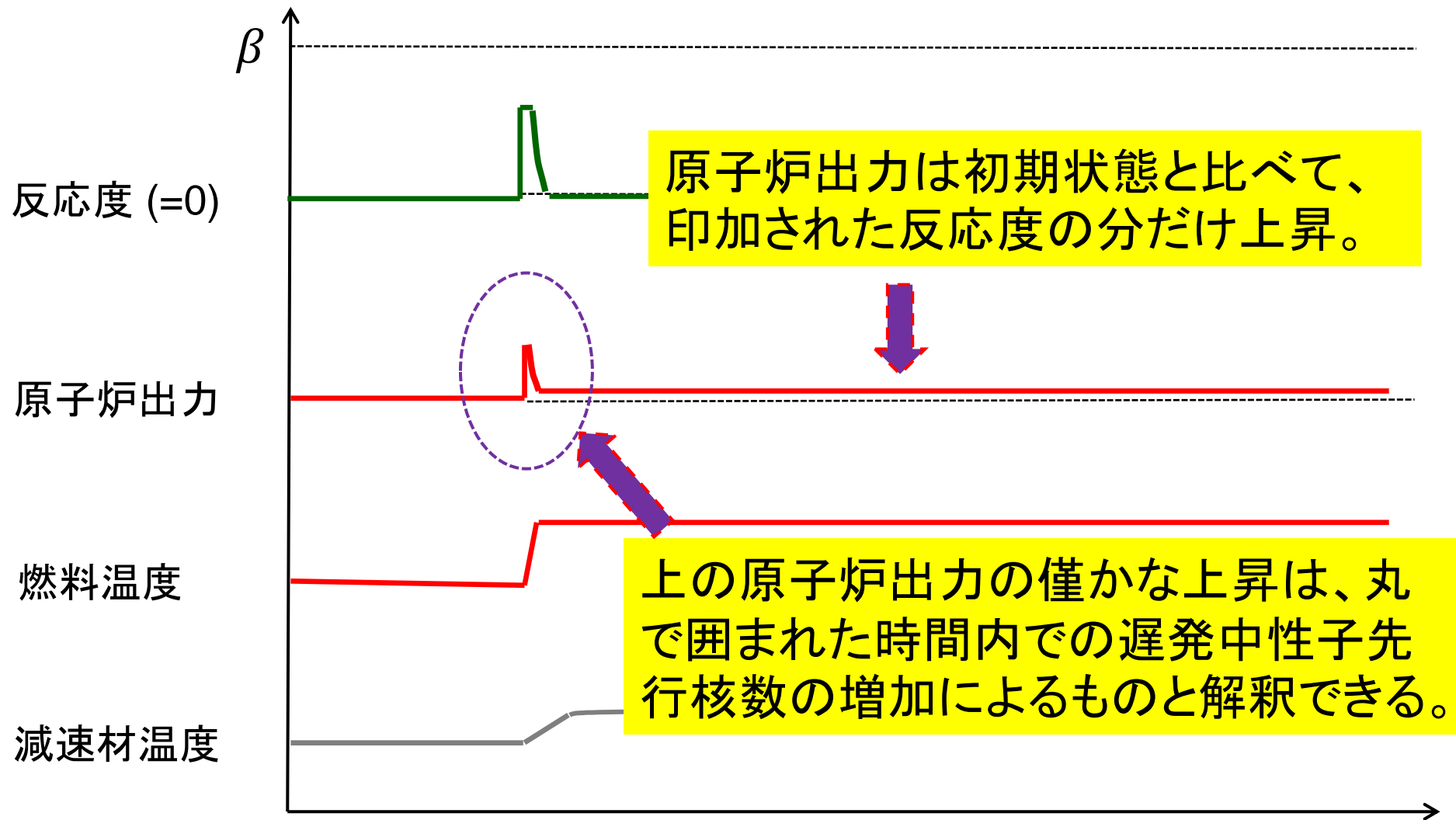
原子炉の過渡応答(フィードバック有り)



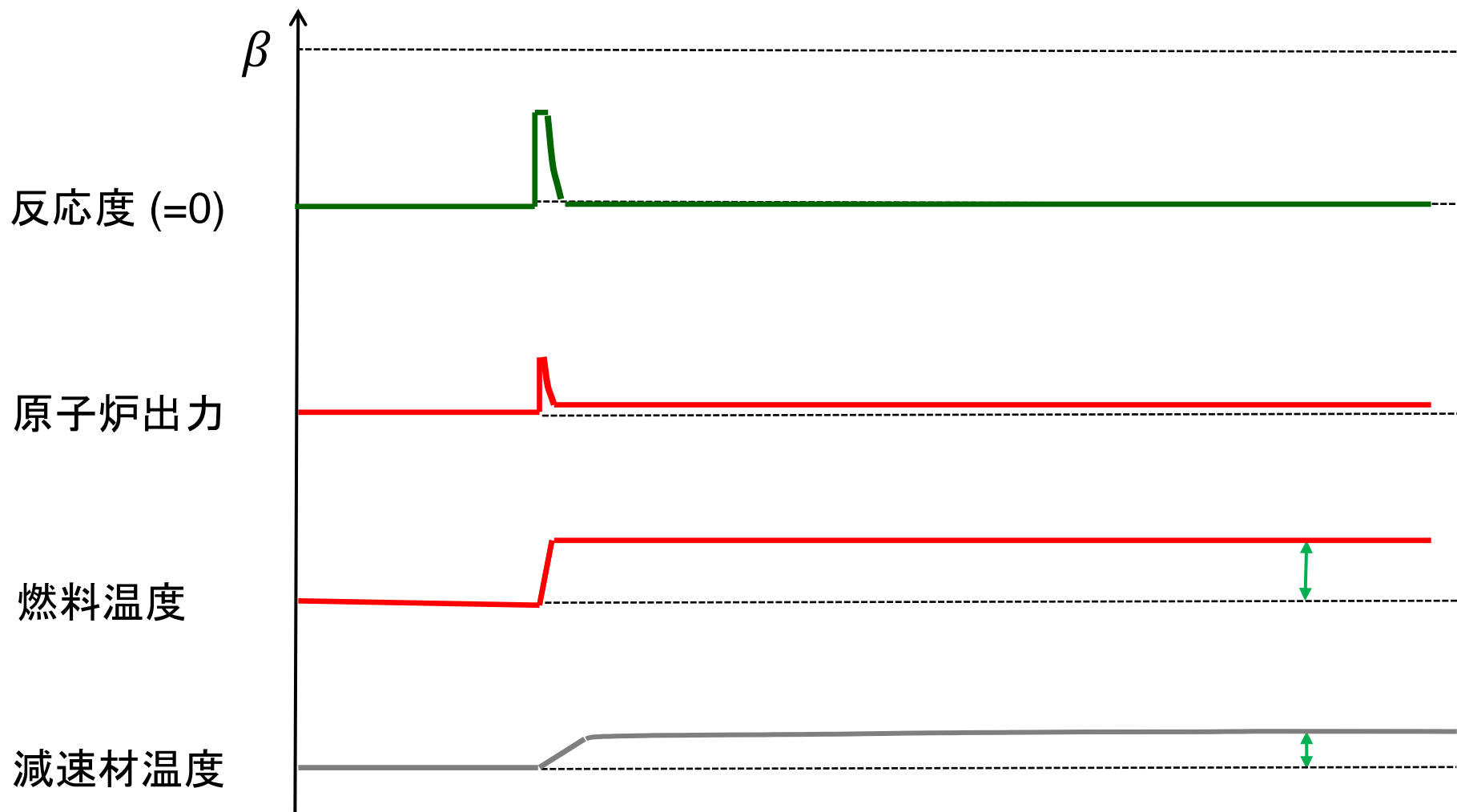
原子炉の過渡応答(フィードバック有り)



原子炉の過渡応答(フィードバック有り)

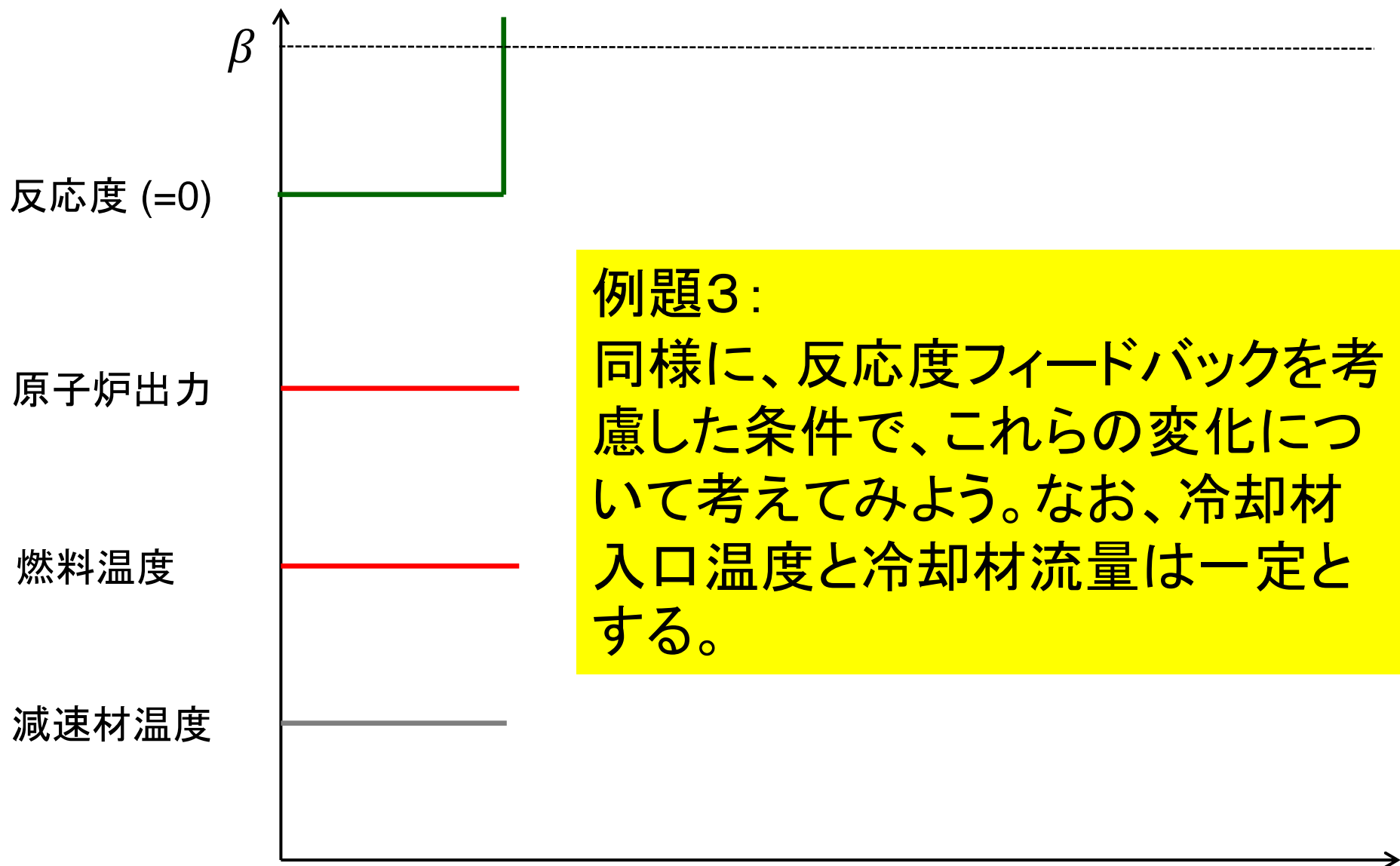


原子炉の過渡応答(フィードバック有り)



最初に印加された反応度は、燃料温度、減速材温度のフィードバックにより相殺された、と理解できる。

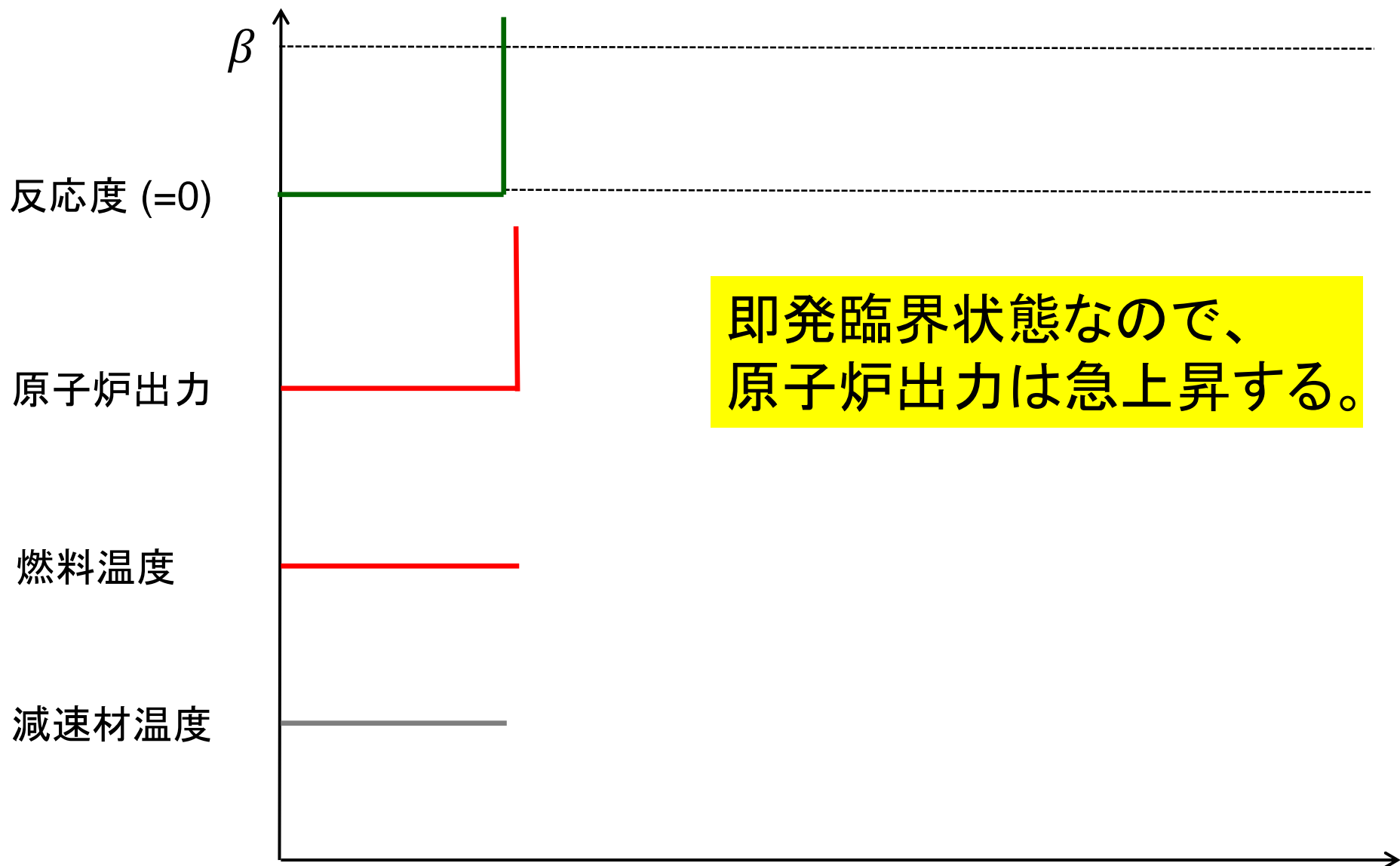
原子炉の過渡応答(フィードバック有り・即発臨界超過)



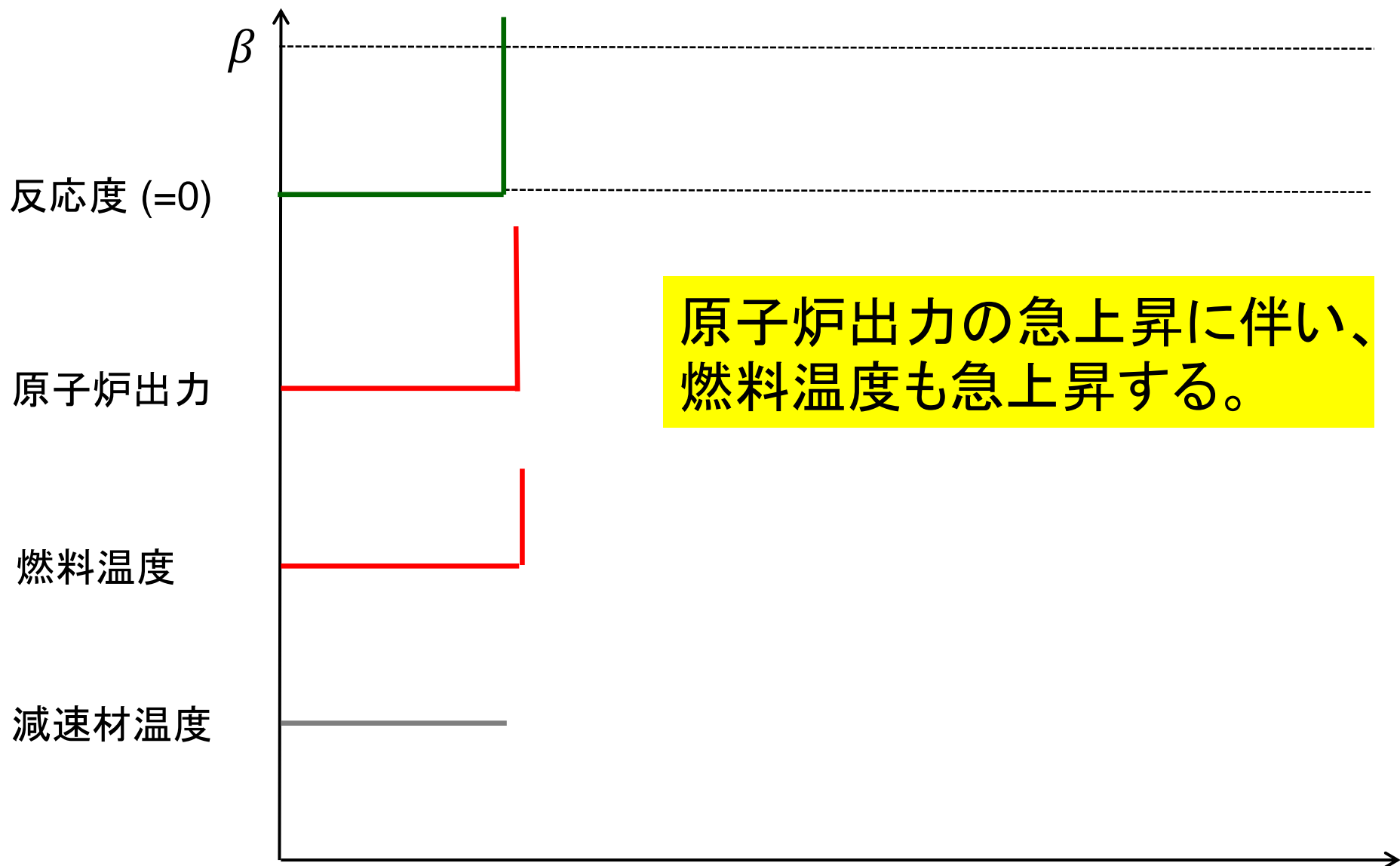
例題3:

同様に、反応度フィードバックを考慮した条件で、これらの変化について考えてみよう。なお、冷却材入口温度と冷却材流量は一定とする。

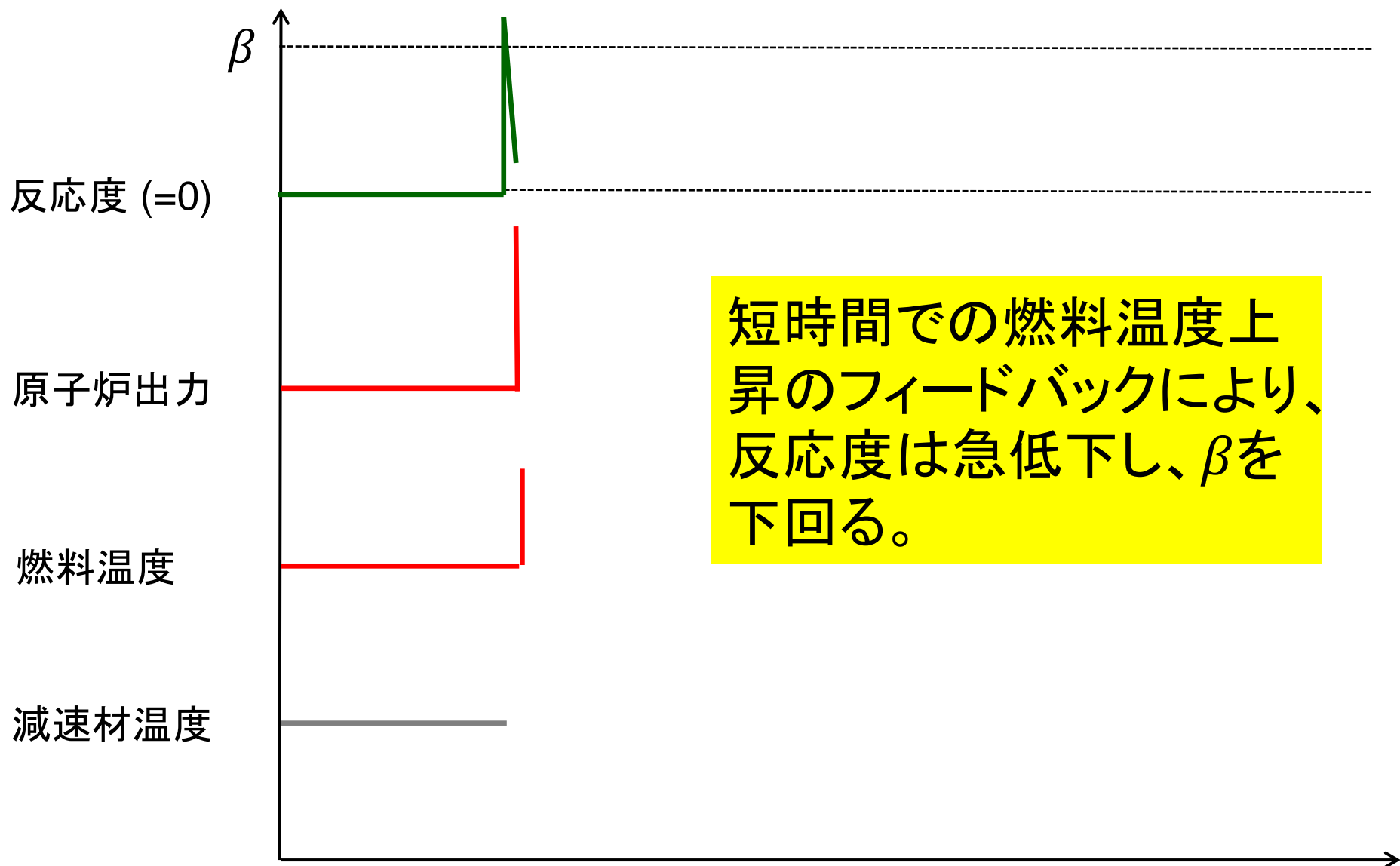
原子炉の過渡応答(フィードバック有り・即発臨界超過)



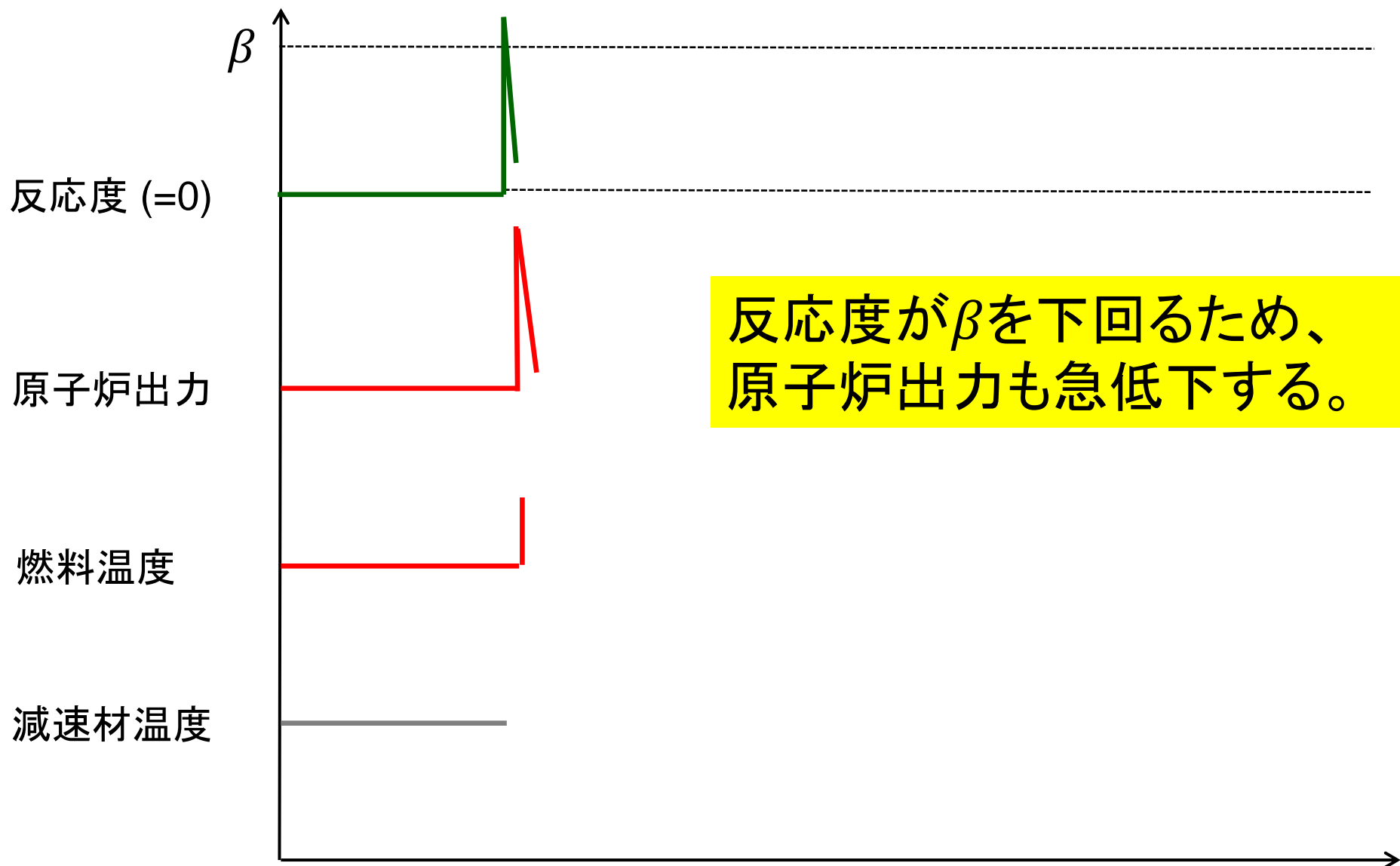
原子炉の過渡応答(フィードバック有り・即発臨界超過)



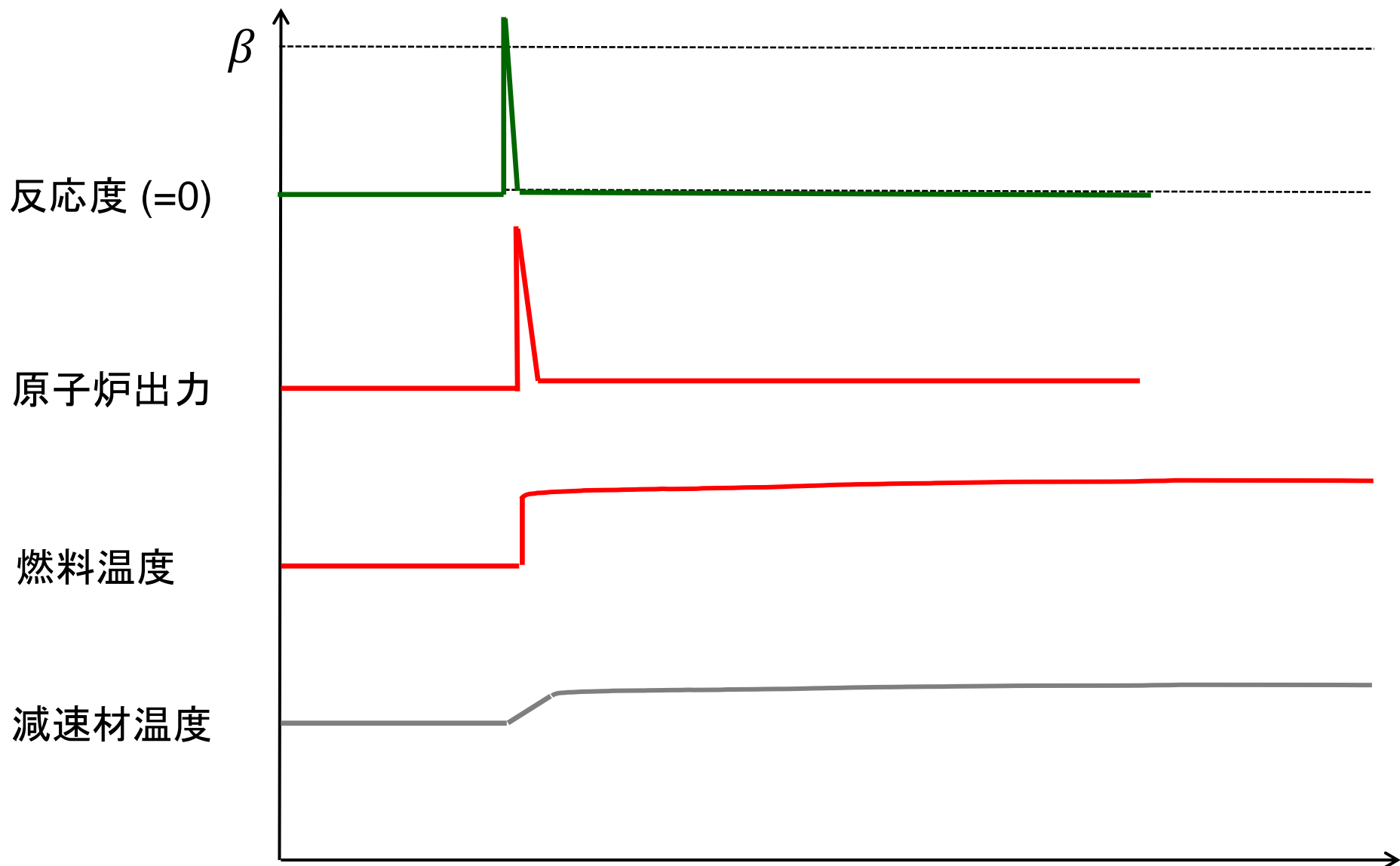
原子炉の過渡応答(フィードバック有り・即発臨界超過)



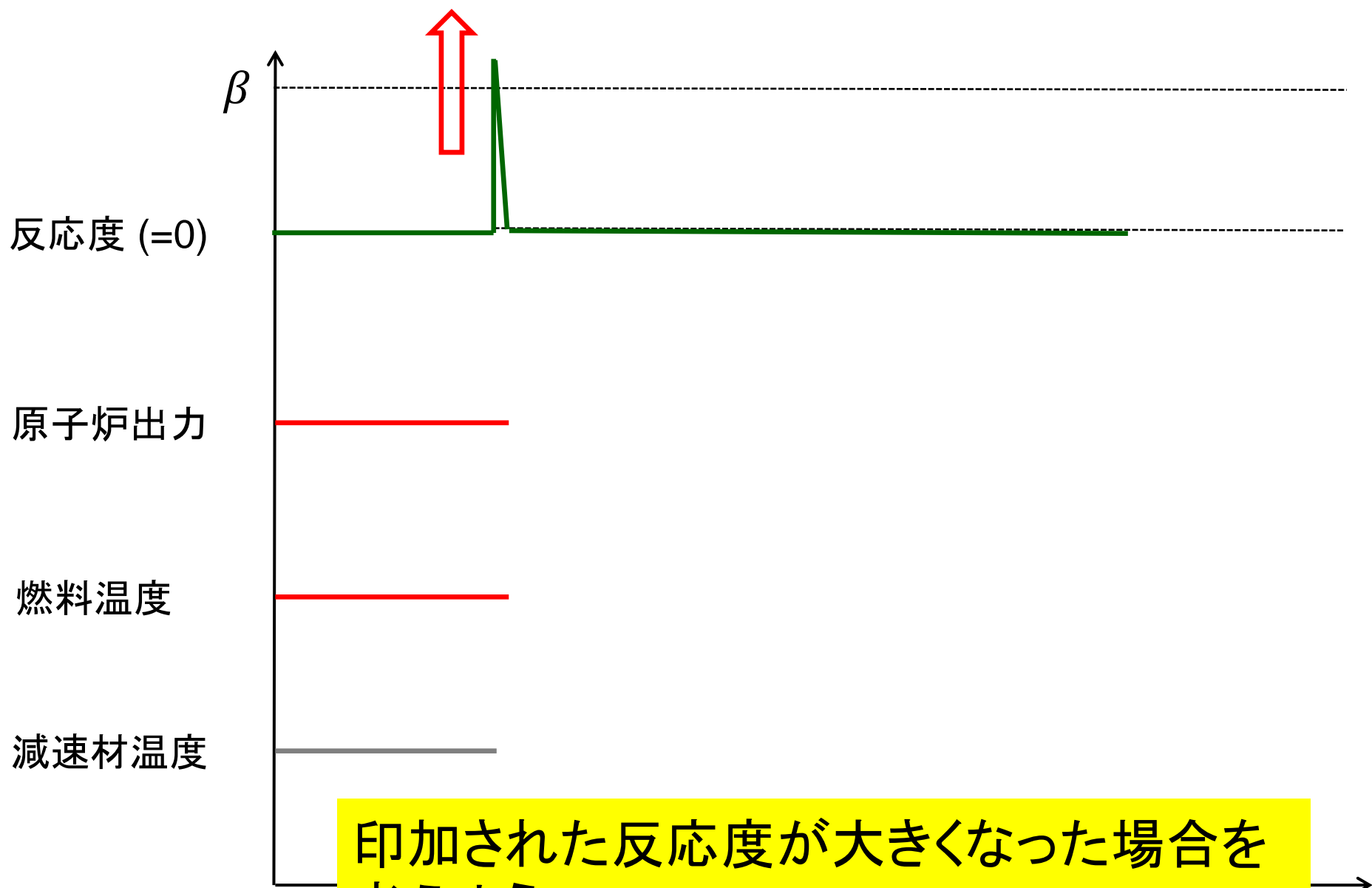
原子炉の過渡応答(フィードバック有り・即発臨界超過)



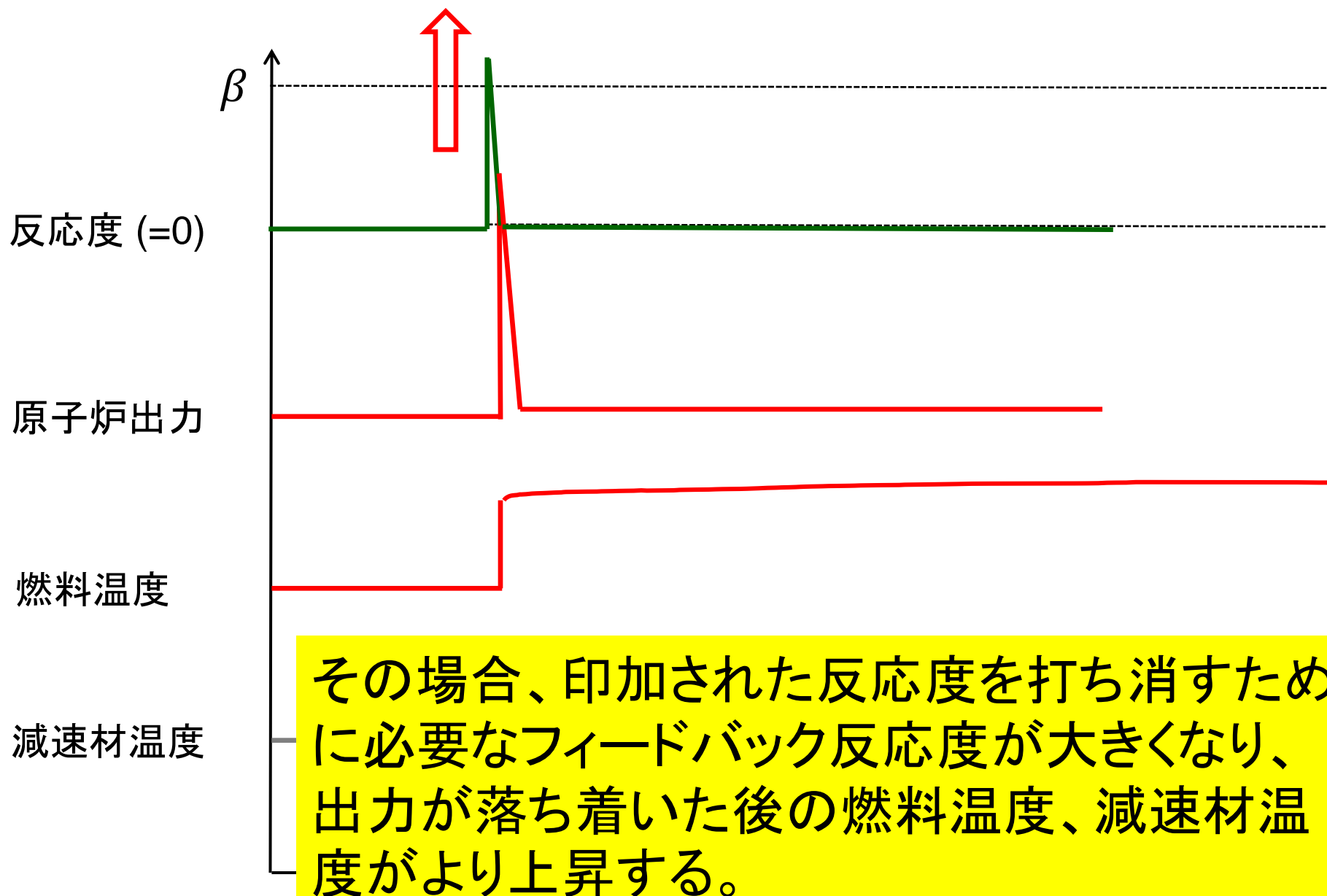
原子炉の過渡応答(フィードバック有り・即発臨界超過)



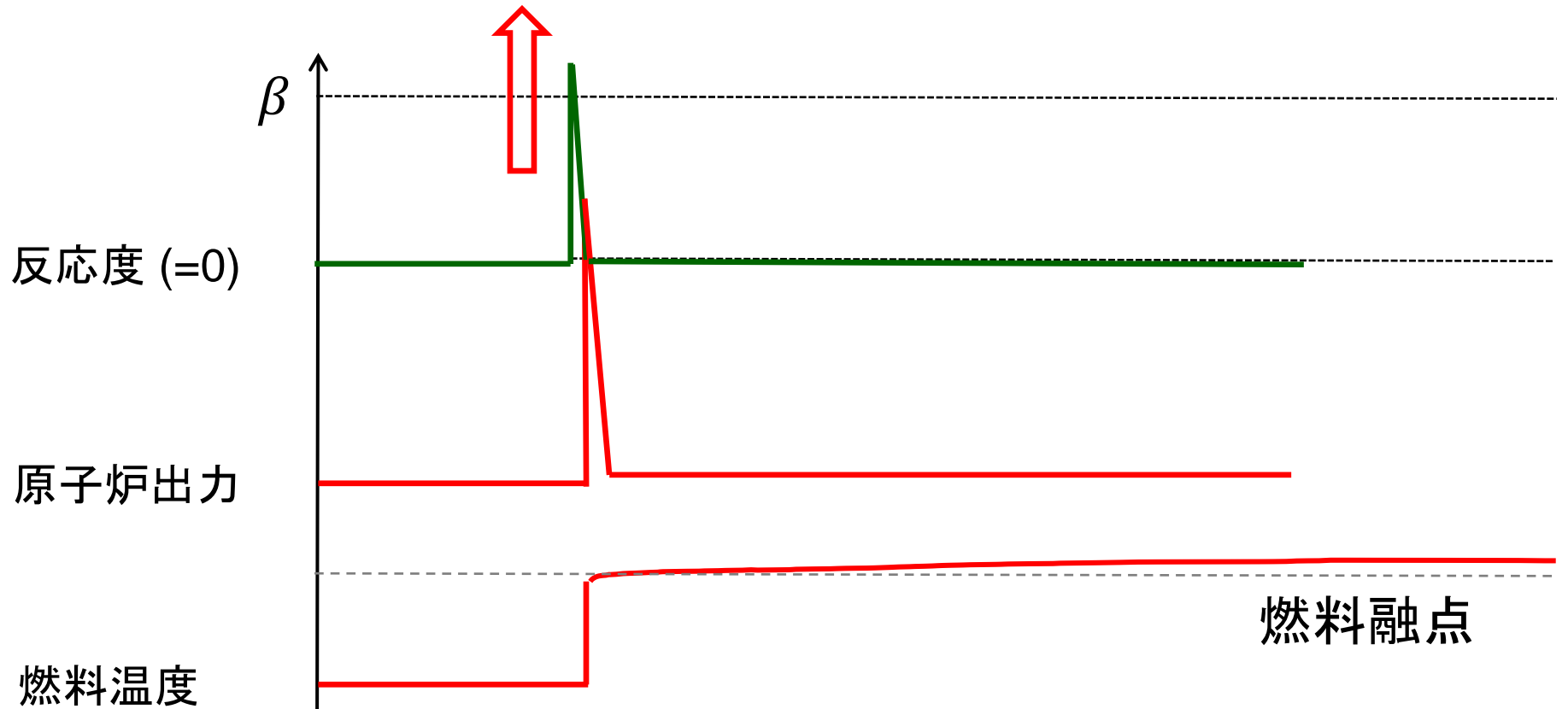
原子炉の過渡応答(フィードバック有り・即発臨界超過)



原子炉の過渡応答(フィードバック有り・即発臨界超過)



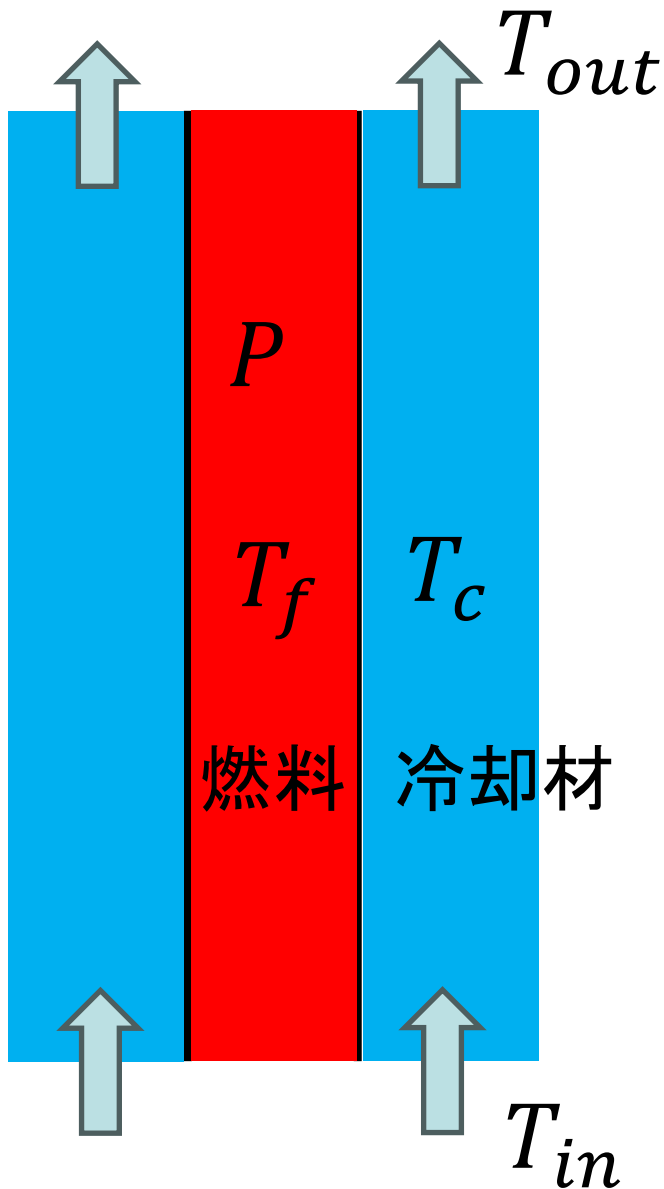
原子炉の過渡応答(フィードバック有り・即発臨界超過)



例えば、燃料温度が融点を超えてしまうと燃料破損が起こる。また、燃料温度が融点を超えなくても、破裂や被覆管の焼損などで燃料が破損する可能性がある。

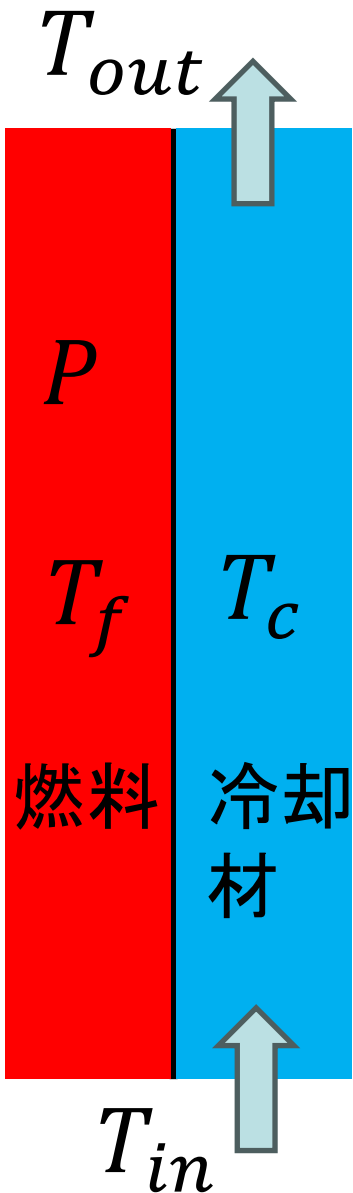
原子炉簡易動特性モデルを用いた 過渡解析

原子炉の簡易動特性モデル



時間を t としたときの、
原子炉出力 $P(t)$ 、
燃料温度 $T_f(t)$ 、
冷却材温度 $T_c(t)$ の
過渡変化を、簡易的にモデ
ル化する。

原子炉の簡易動特性モデル



・原子炉出力 $P(t)$ は一点炉動特性モデルで計算する。

・反応度フィードバックは以下のモデルで求める。 ΔT_f 、 ΔT_c はそれぞれ基準値に対する差異を示す。

$$\rho = \rho_{ex} + \alpha_f \Delta T_f + \alpha_c \Delta T_c$$

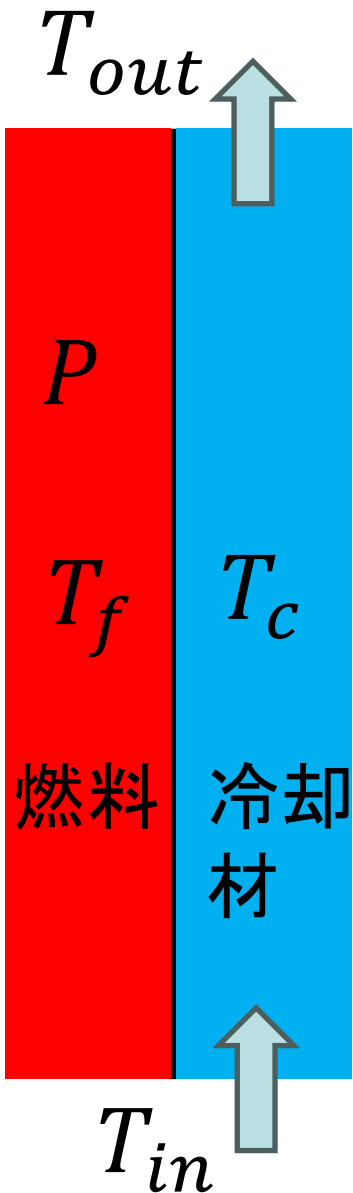
燃料温度
フィードバック

冷却材温度
フィードバック

制御棒操作等により
与えられる反応度

・ α_f 、 α_c は、それぞれ -2.4pcm/K 、 -6.0pcm/K とした。

原子炉の簡易動特性モデル



- ・燃料温度 $T_f(t)$ は以下のモデルで求める。

$$m_f C_f \frac{dT_f}{dt} = P - h_{fc} A_{fc} (T_f - T_c)$$

燃料から冷却材
への熱伝達

- ・冷却材温度 $T_c(t)$ は以下のモデルで求める。

$$m_c C_c \frac{dT_c}{dt} = h_{fc} A_{fc} (T_f - T_c) - W C_c (T_{out} - T_{in}) - H$$

外部に取り出され
る熱エネルギー

冷却材から構造
物への熱損失

反応度印加の条件

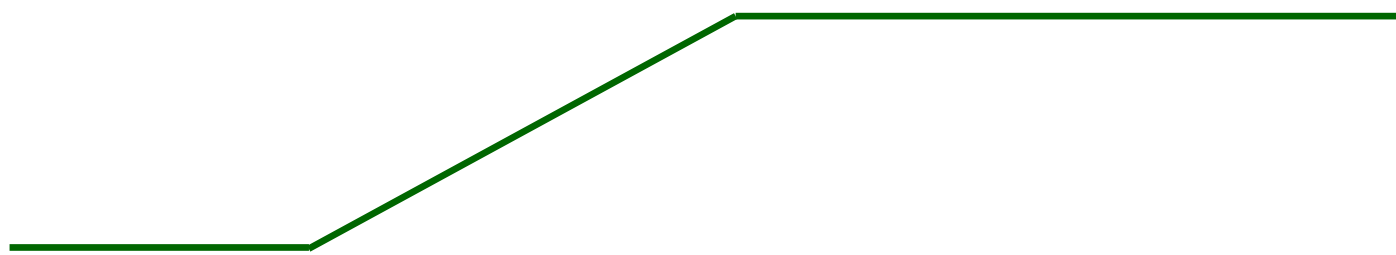
ステップ状

反応度 (=0)

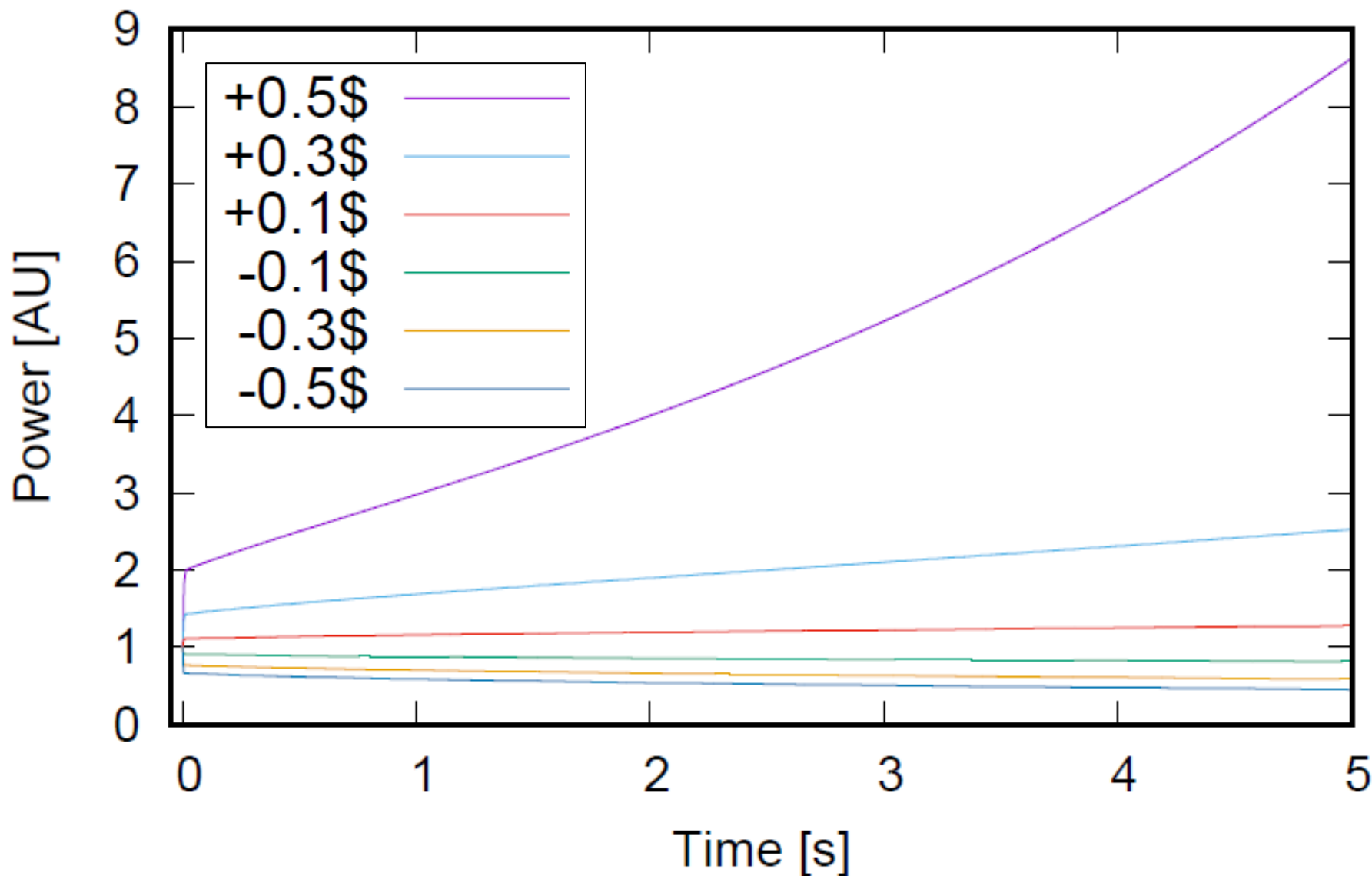


ランプ状

反応度 (=0)

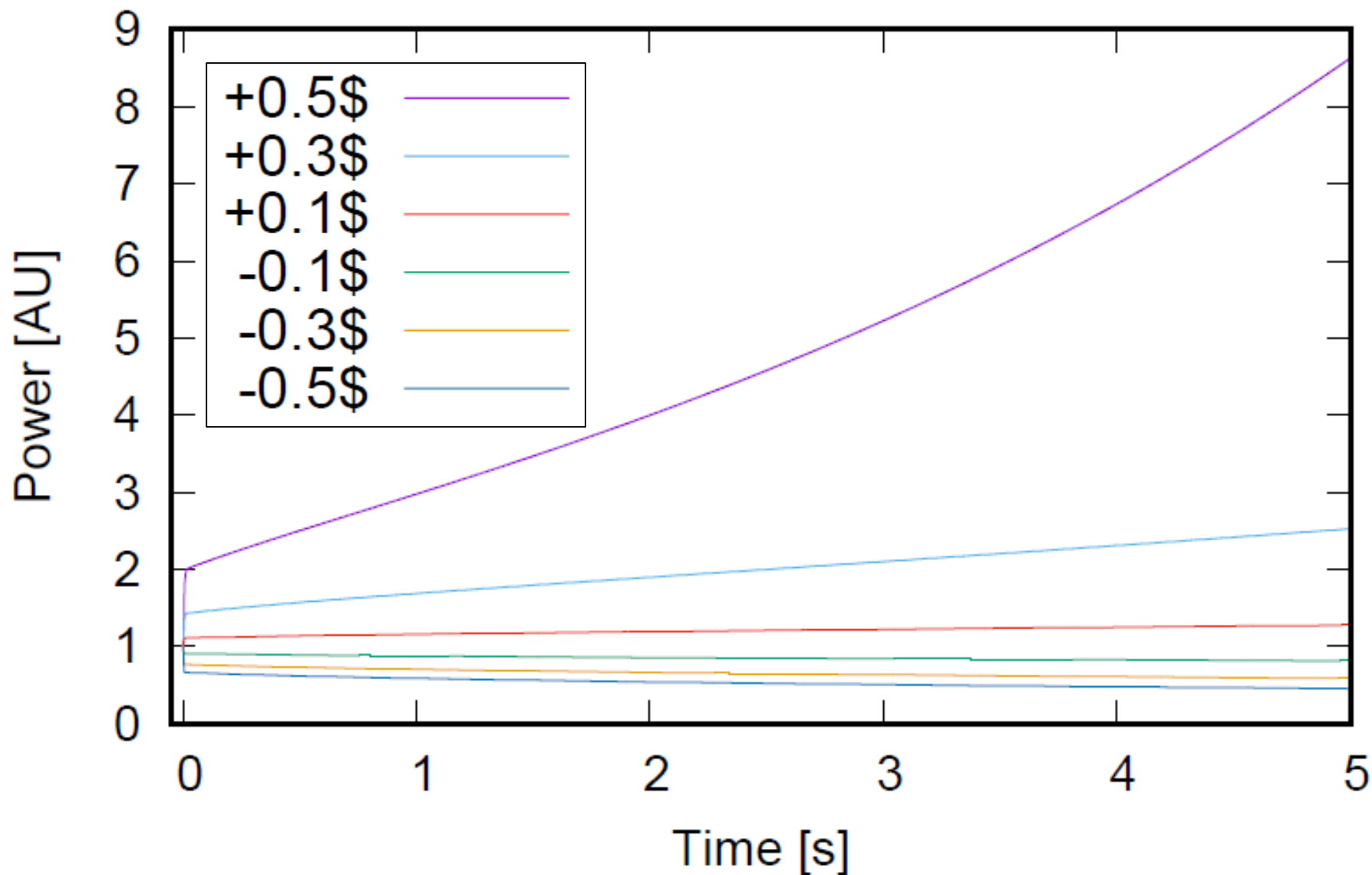


ステップ状の反応度印加(反応度フィードバック無視):出力



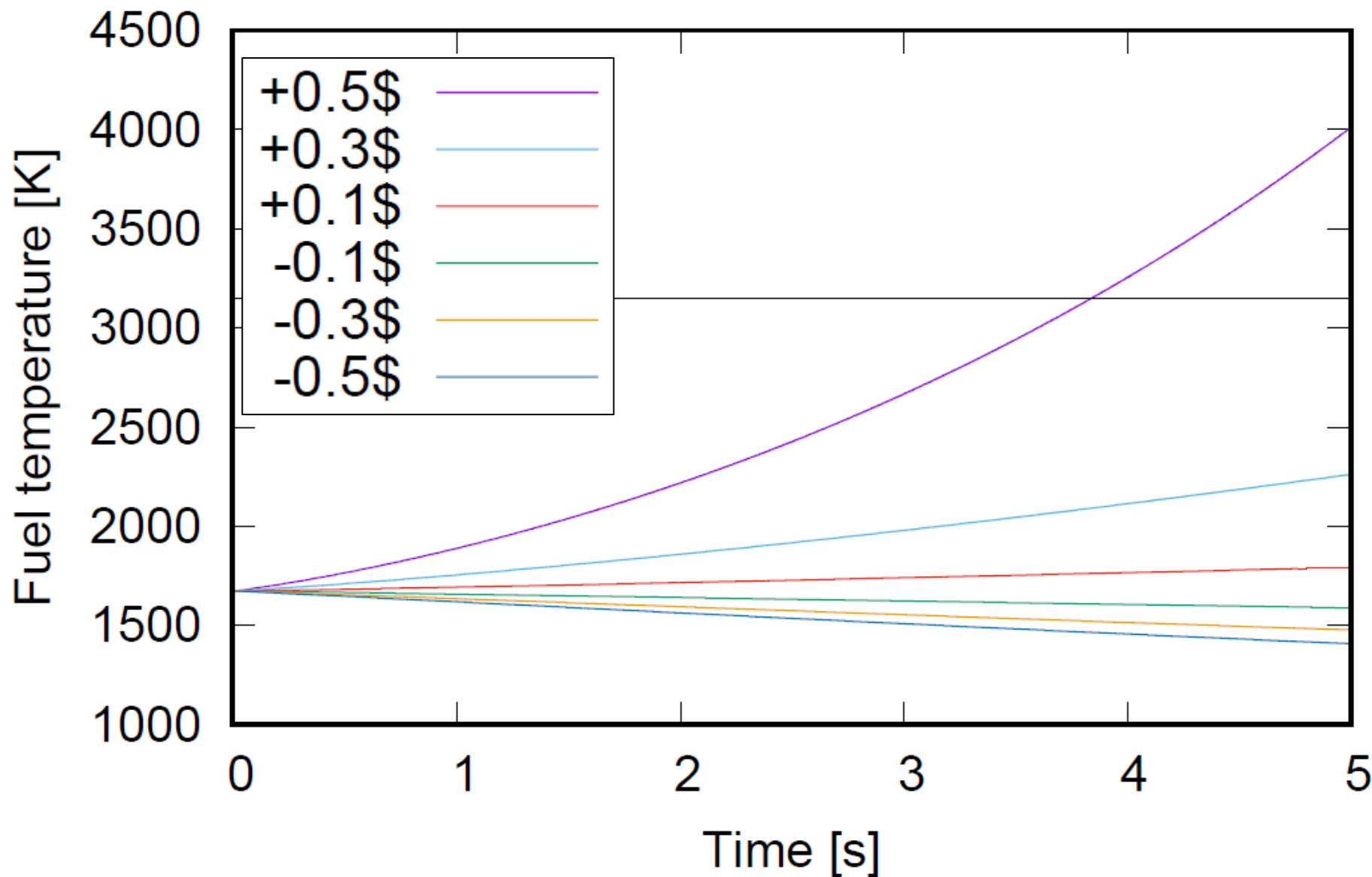
反応度印加直後の即発跳躍が観察される。

ステップ状の反応度印加(反応度フィードバック無視):出力



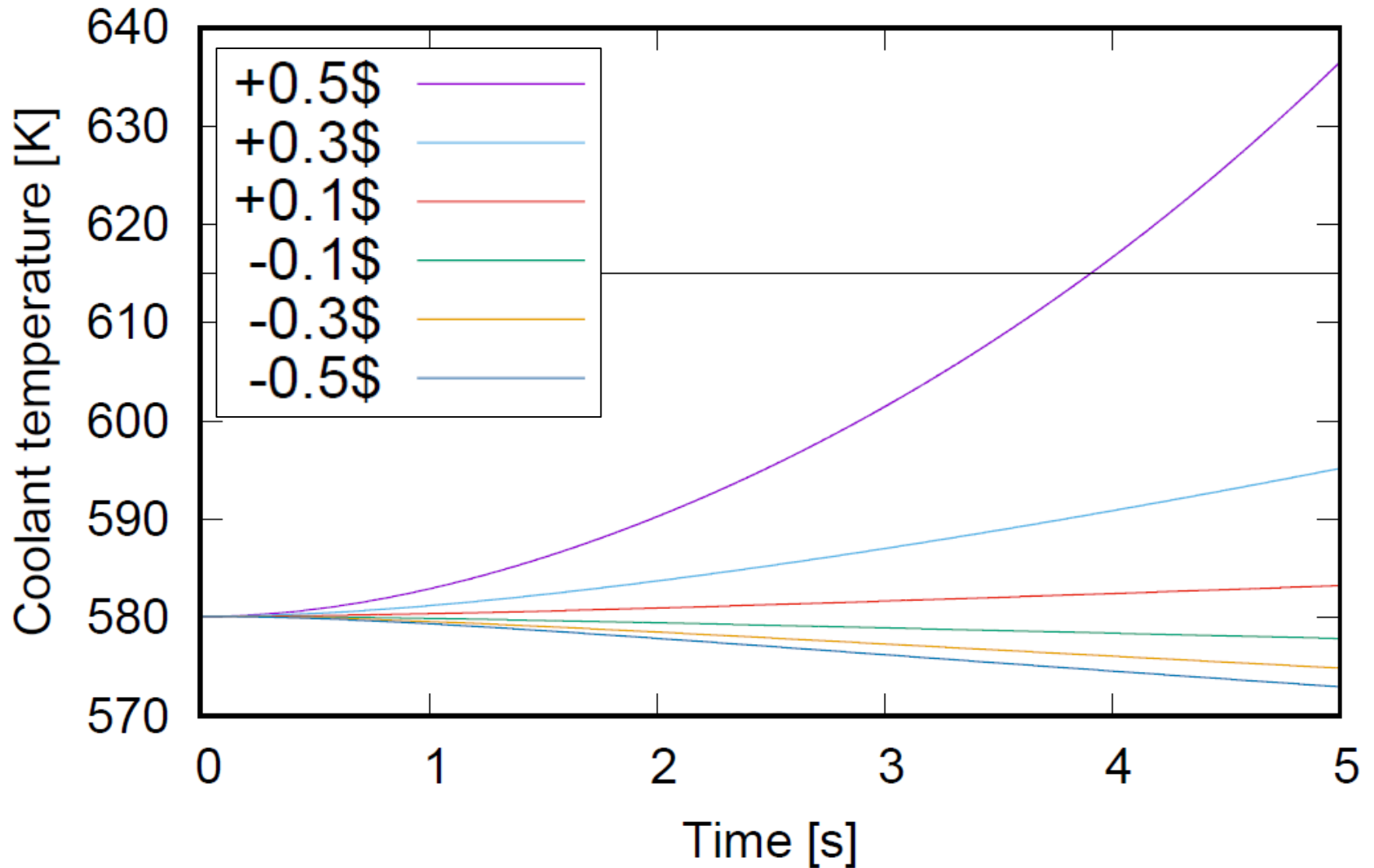
+0.5 \$ の反応度印加では5秒後に出力が9倍となる。

ステップ状の反応度印加(反応度フィードバック無視) : 燃料温度



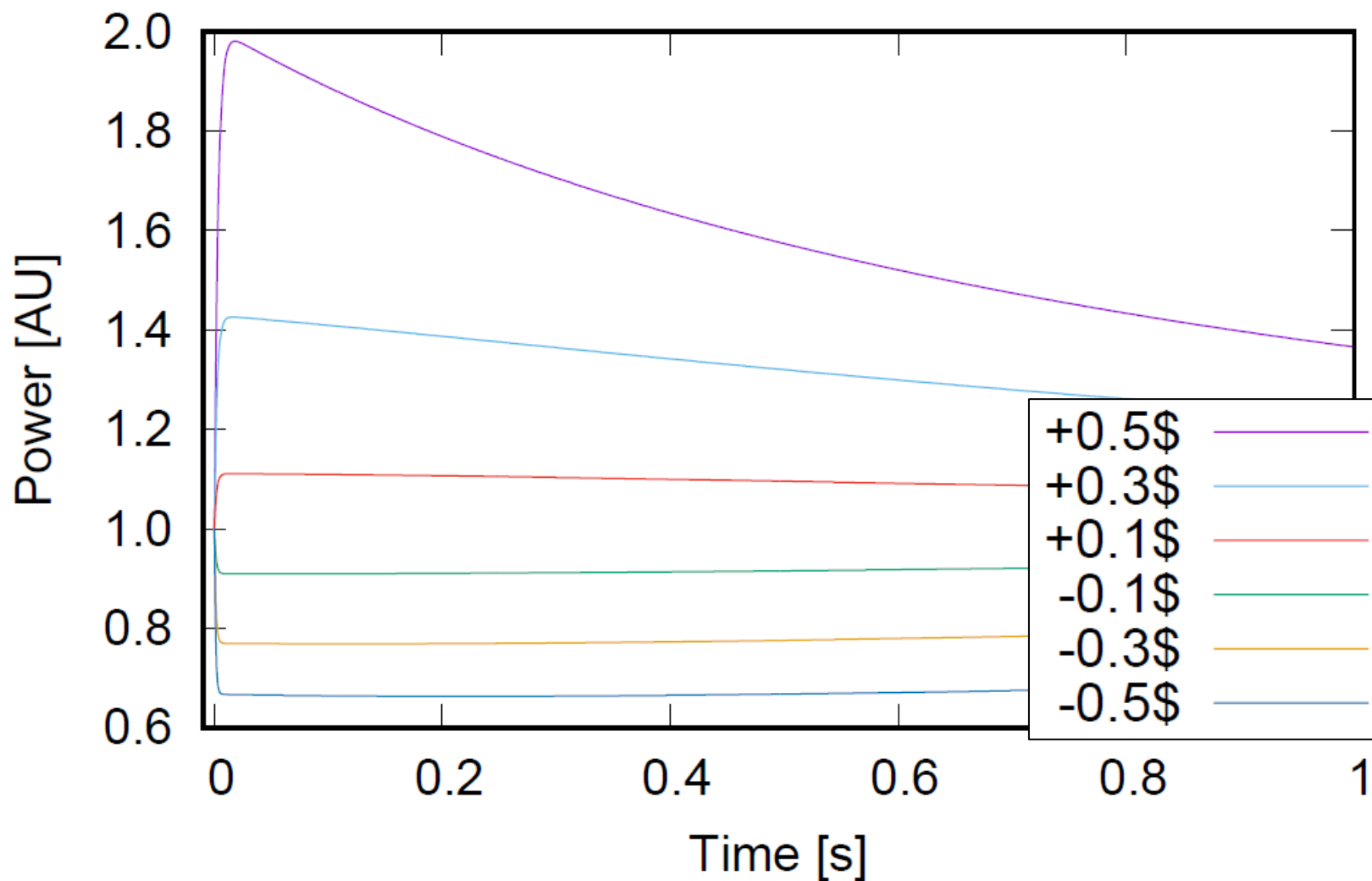
+0.5\$ の反応度印加では4秒後に融点を超える。

ステップ状の反応度印加(反応度フィードバック無視) : 冷却材温度



+0.5\$ の反応度印加では4秒後に沸点を超える。

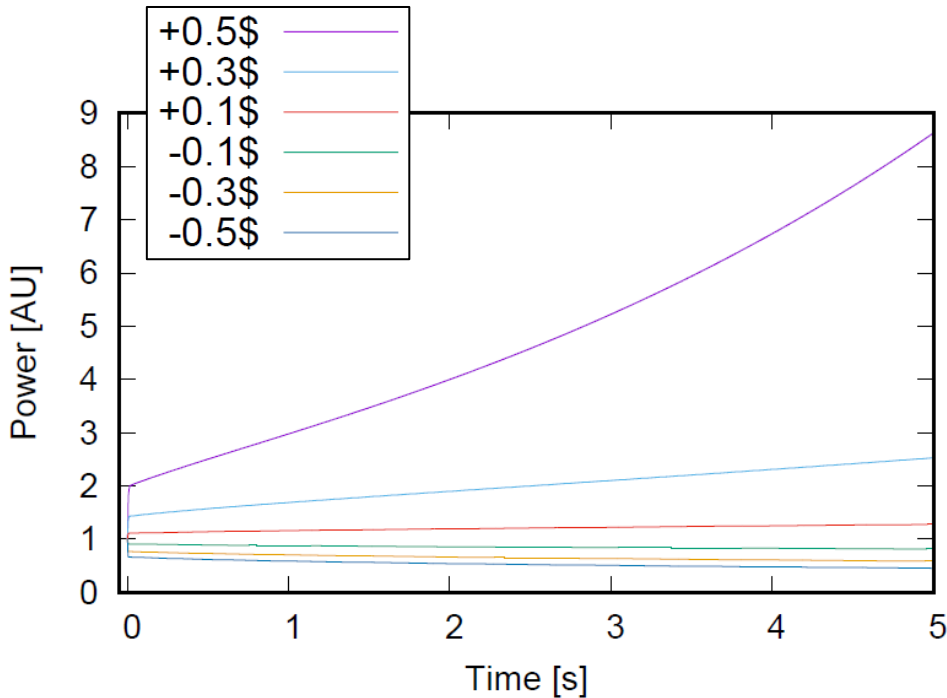
ステップ状の反応度印加(反応度フィードバックあり):出力



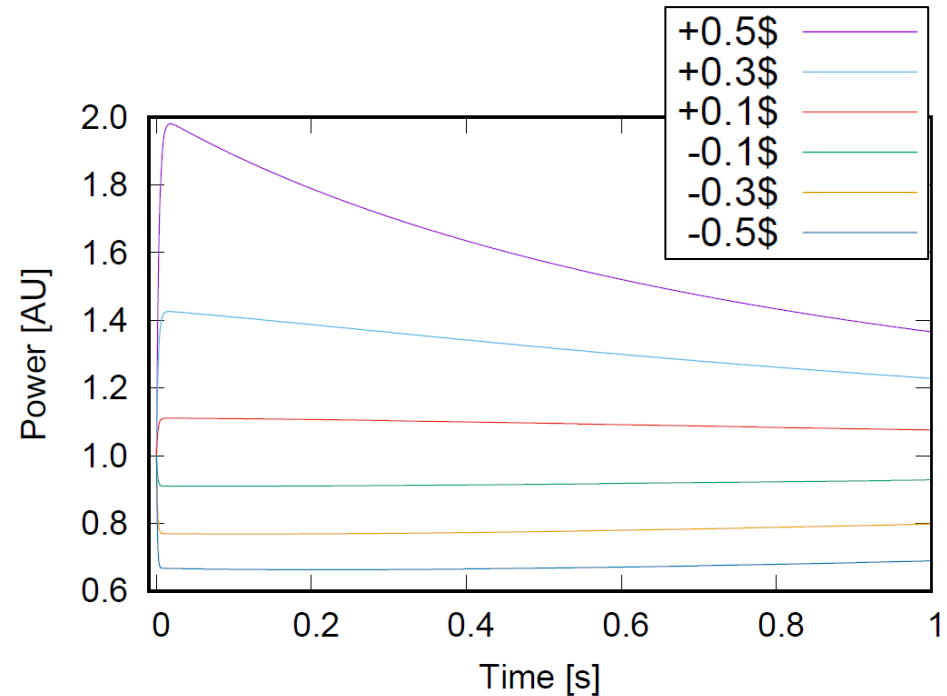
即発跳躍の振る舞いは変わらないが、温度フィードバックにより、即発跳躍後の出力変化は抑制方向となる。

ステップ状の反応度印加:出力

反応度フィードバックなし

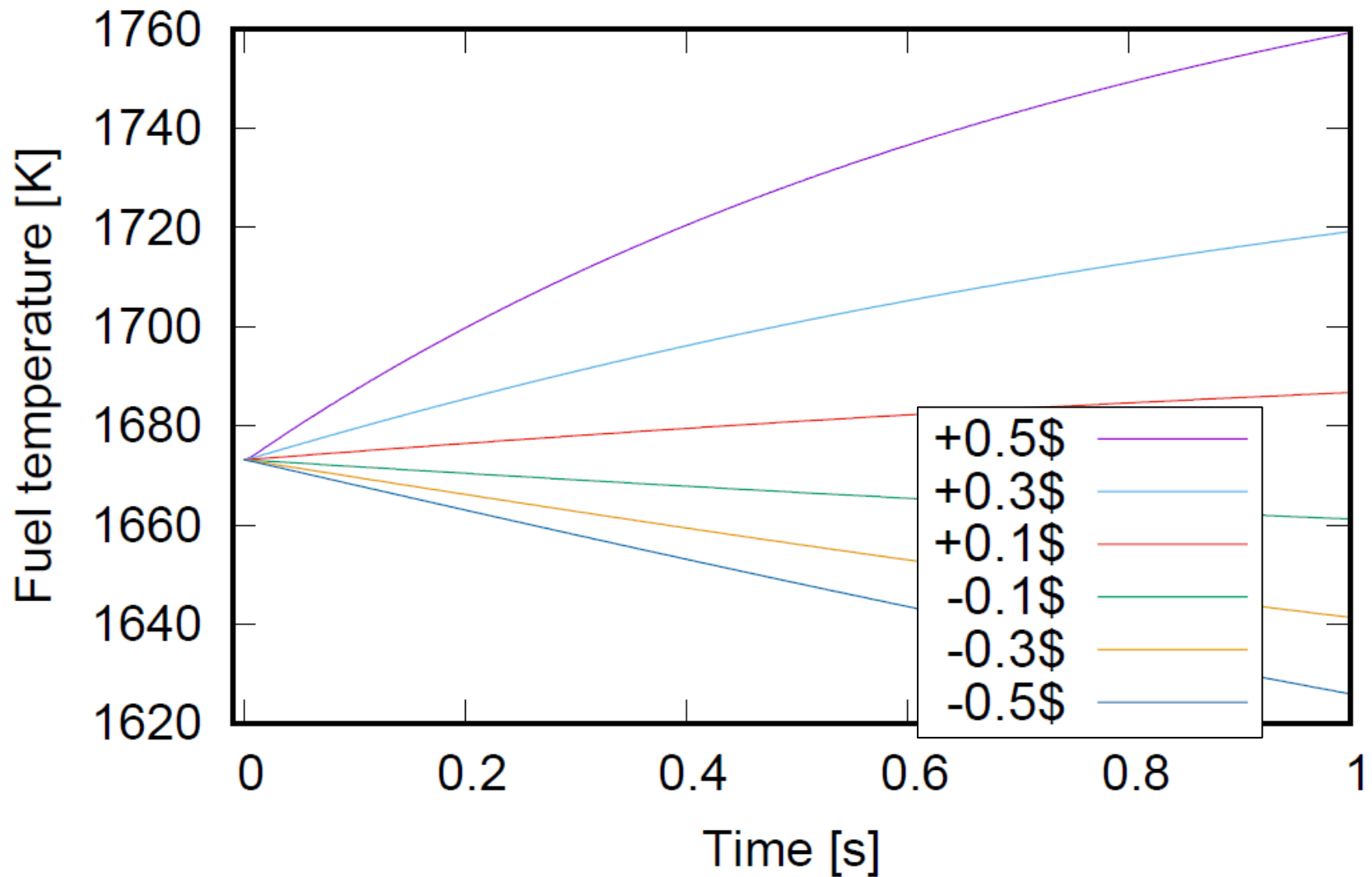


反応度フィードバックあり



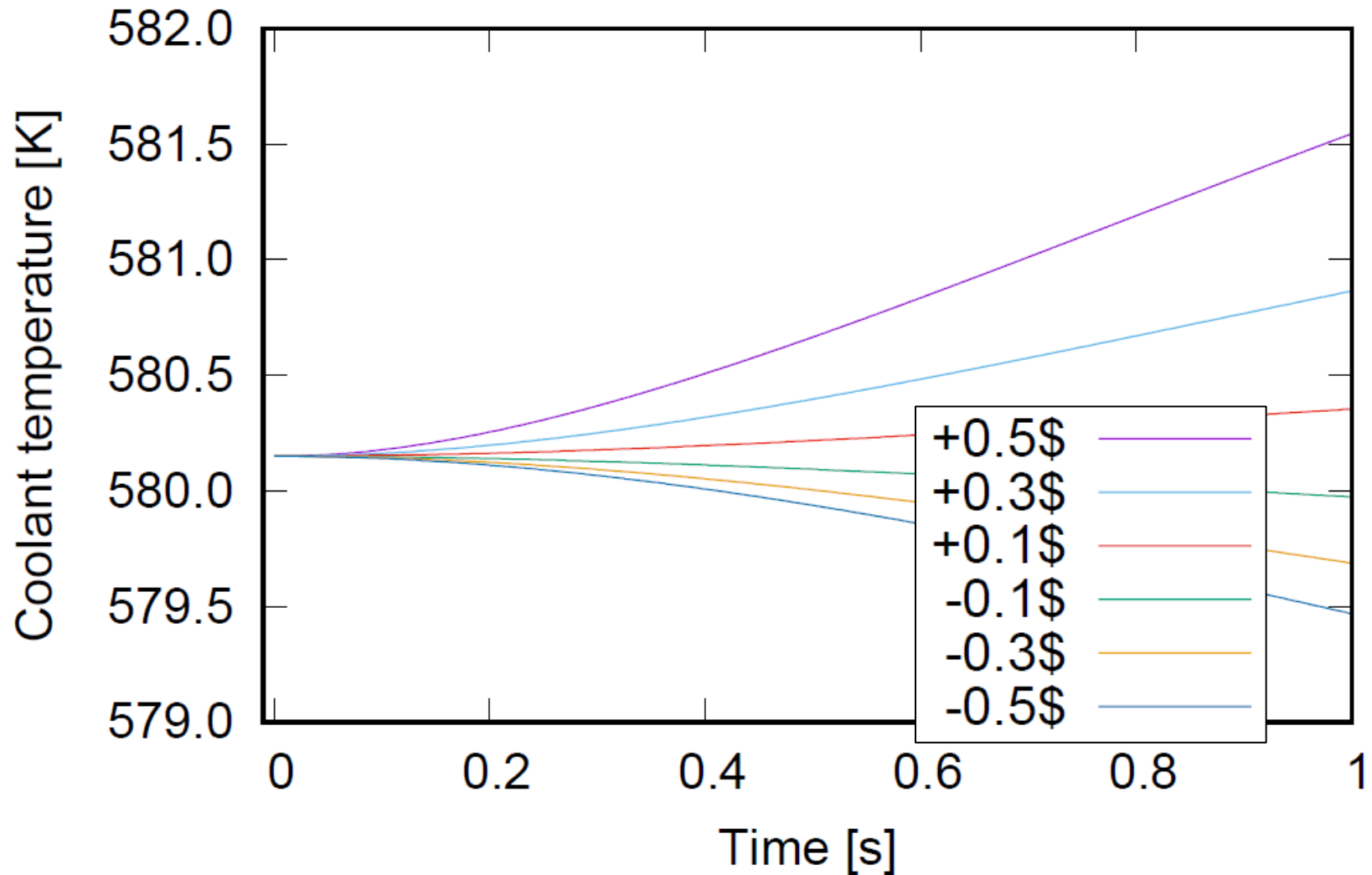
温度フィードバックにより、即発跳躍後の出力変化は抑制方向となる。

ステップ状の反応度印加: 燃料温度



燃料温度は出力の変動に伴い変化し、負の反応度フィードバックを与える。

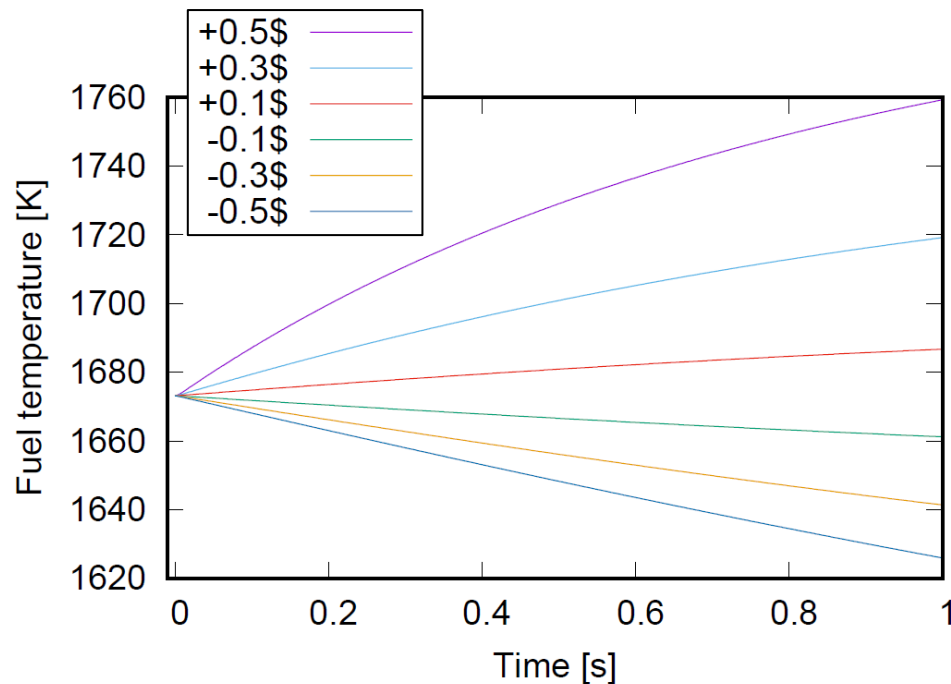
ステップ状の反応度印加: 冷却材温度



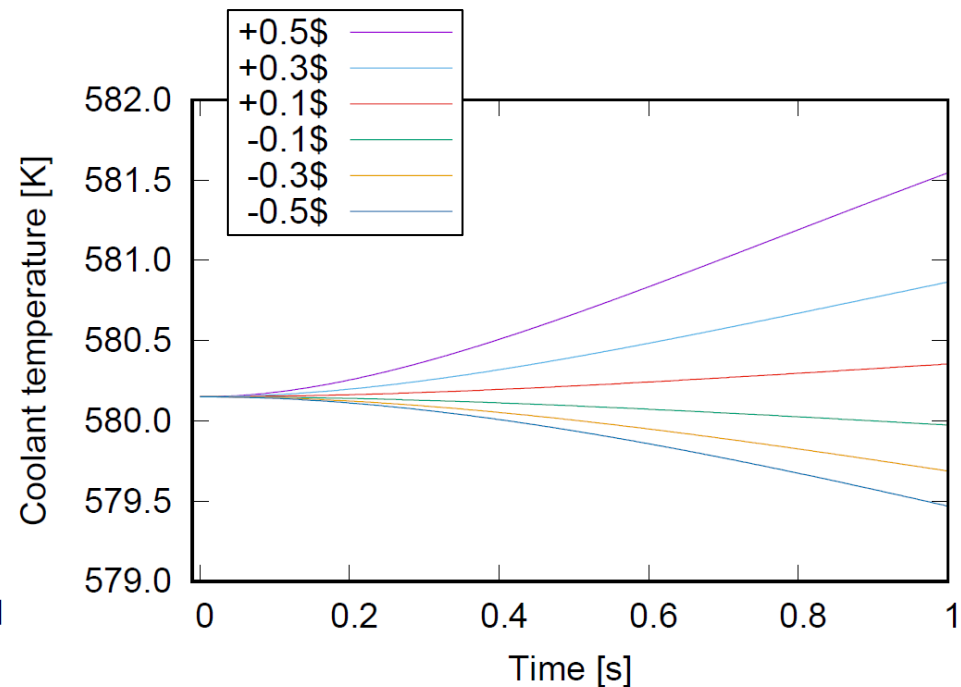
燃料温度の変化よりも少し遅れるが、冷却材温度も短い時間で変動を開始し、負のフィードバック効果をもたらす。

ステップ状の反応度印加: 冷却材温度

燃料温度

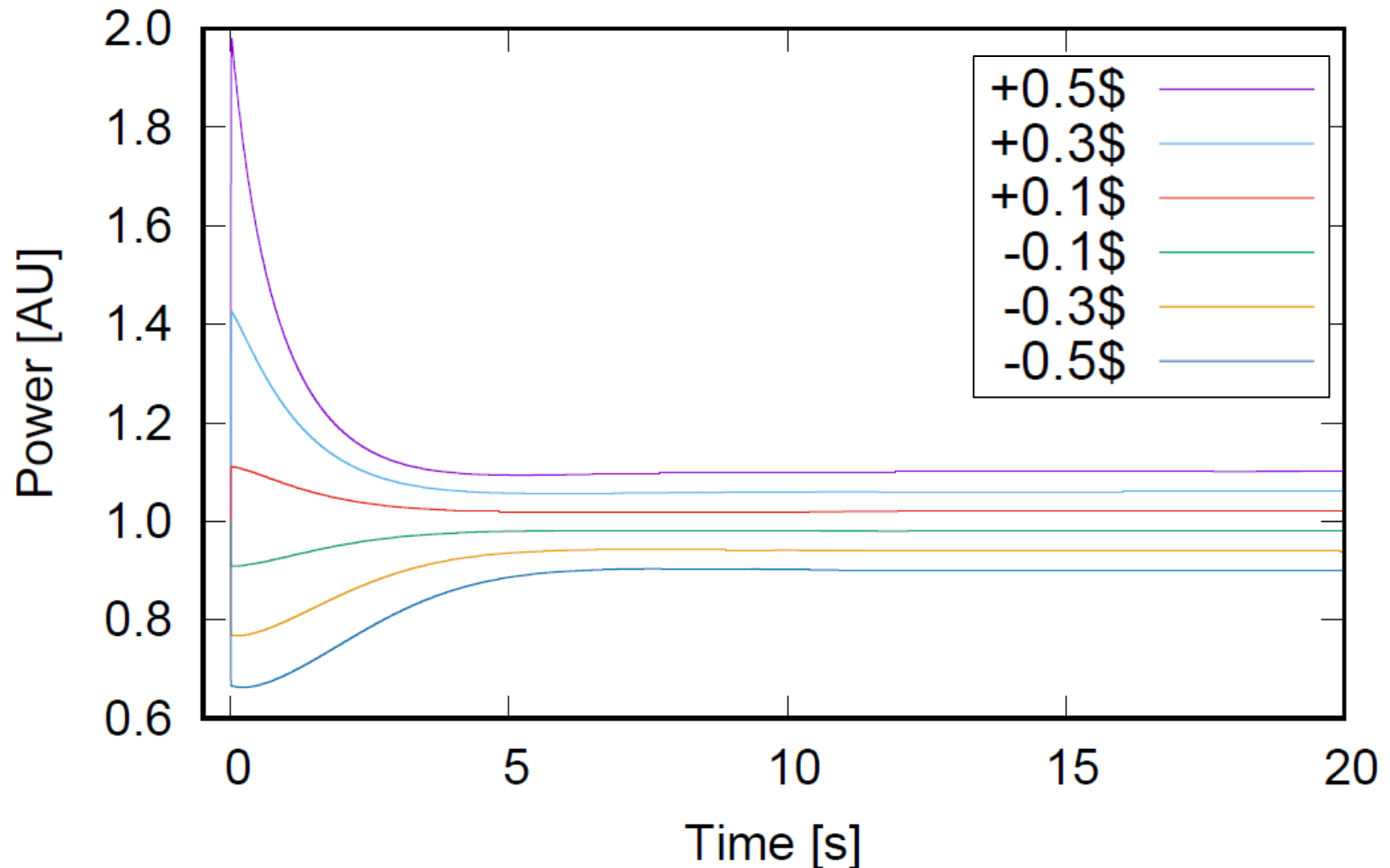


冷却材温度



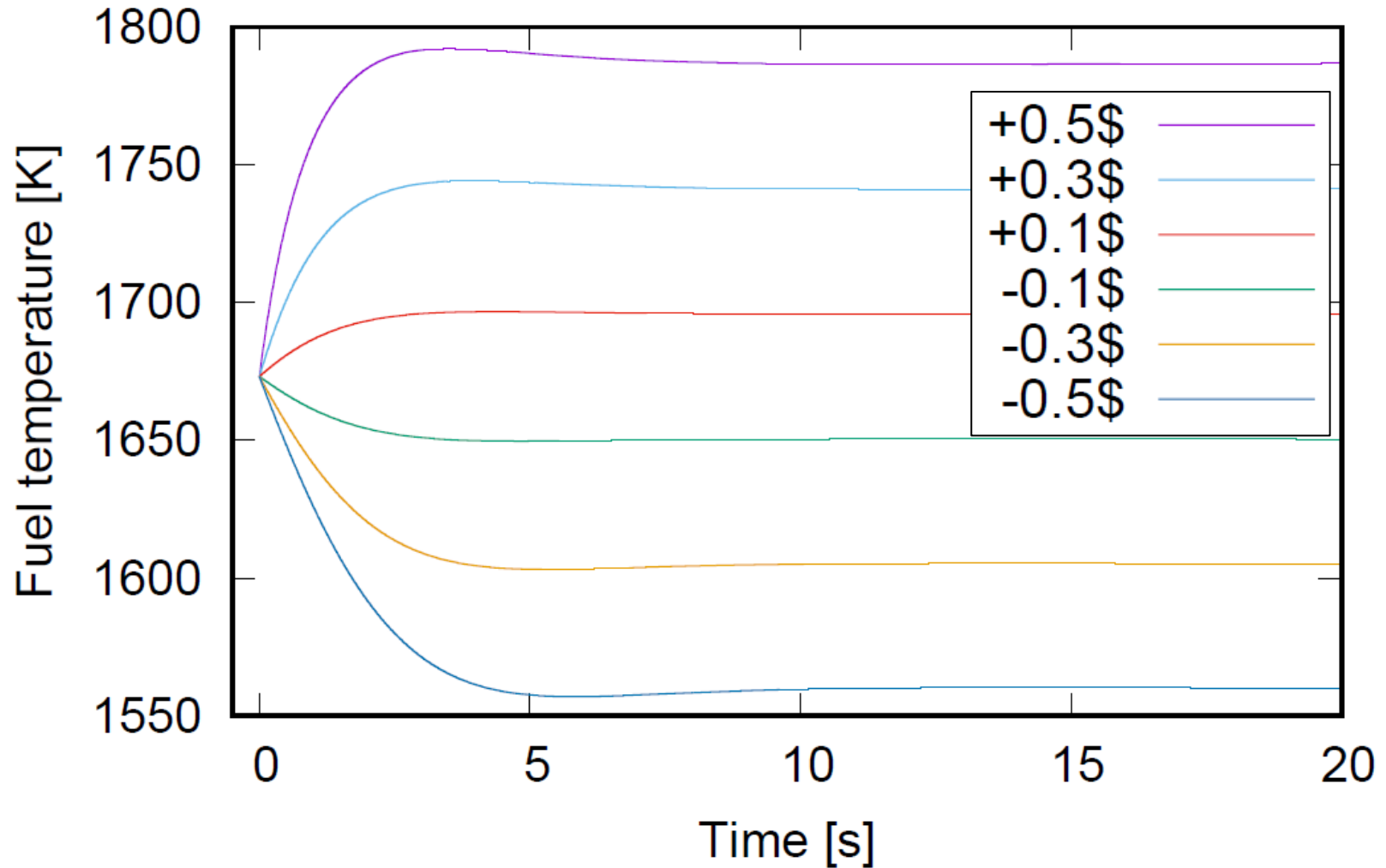
燃料温度の変化よりも少し遅れるが、冷却材温度も短い時間で変動を開始し、負のフィードバック効果をもたらす。

ステップ状の反応度印加:出力



印加された反応度は、反応度印加後の5秒程度でフィードバック反応度と釣り合い、次の定常状態に遷移する。+0.5\$印加時は初期出力の1.1倍程度に落ち着く。

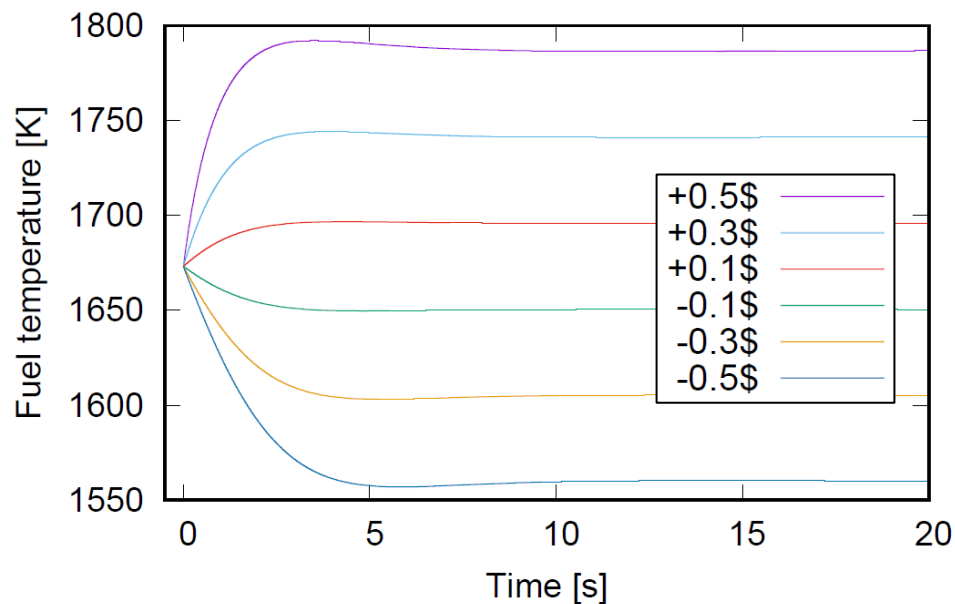
ステップ状の反応度印加: 燃料温度



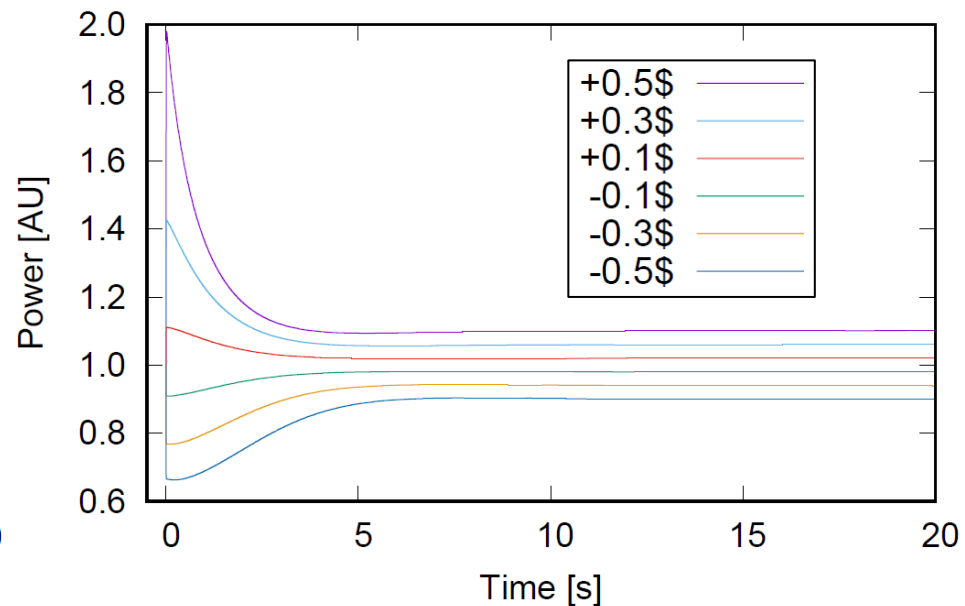
0.5 \$ 印加時、燃料温度は、100K強程度、高い値で定常状態となる。冷却材との温度差は初期状態は1,000Kであったので、温度差は1.1倍となり、出力が1.1倍となったことと対応する。

ステップ状の反応度印加: 燃料温度

燃料温度

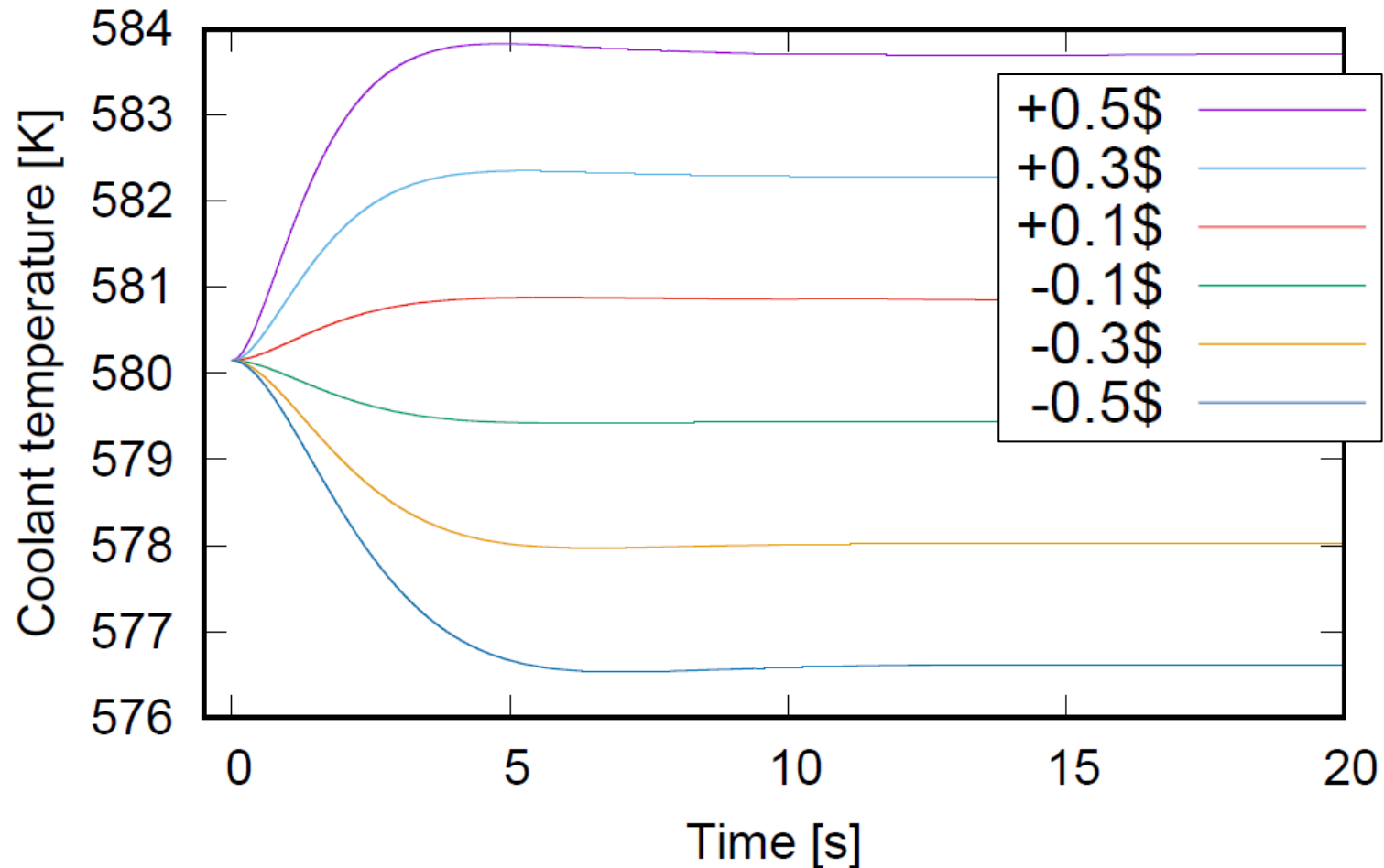


原子炉出力



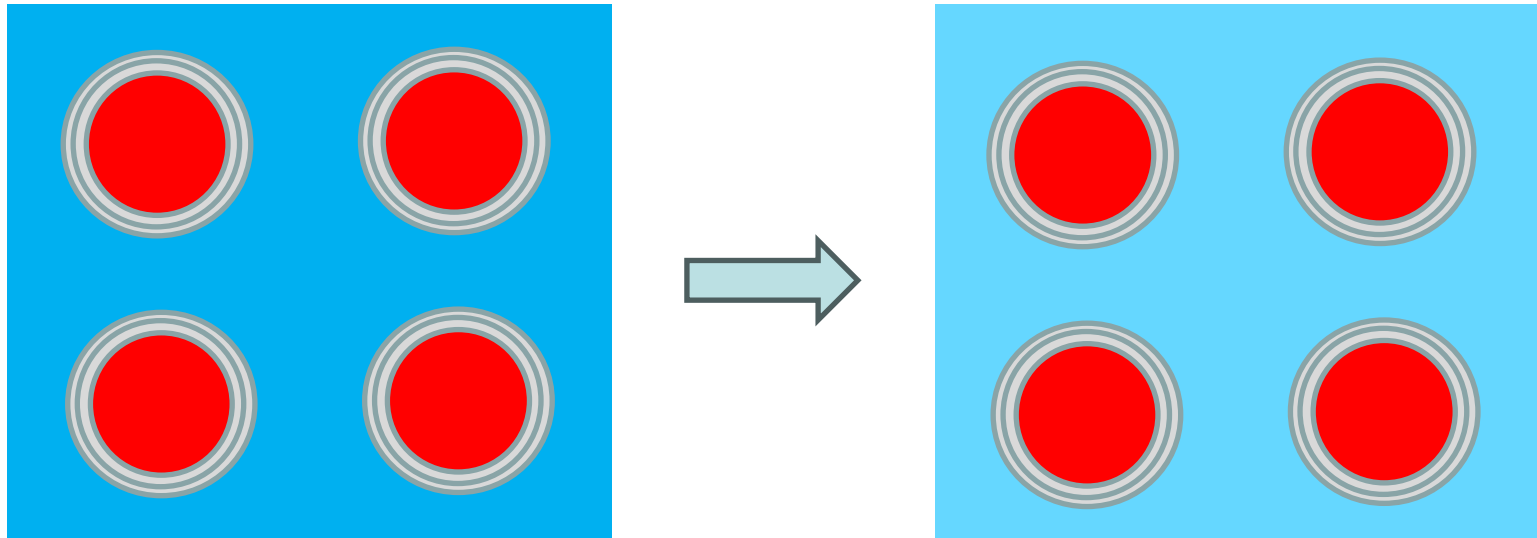
0.5 \$ 印加時、燃料温度は、100K強程度、高い値で定常状態となる。冷却材との温度差は初期状態は1,000Kであったので、温度差は1.1倍となり、出力が1.1倍となったことと対応する。

ステップ状の反応度印加: 冷却材温度



0.5 \$ 印加時、冷却材温度は、4K強程度、高い値で定常状態となる。印加反応度を相殺するための冷却材温度、燃料温度が決まり、それに応じて次の定常状態での炉心出力が決まる、と理解できる。

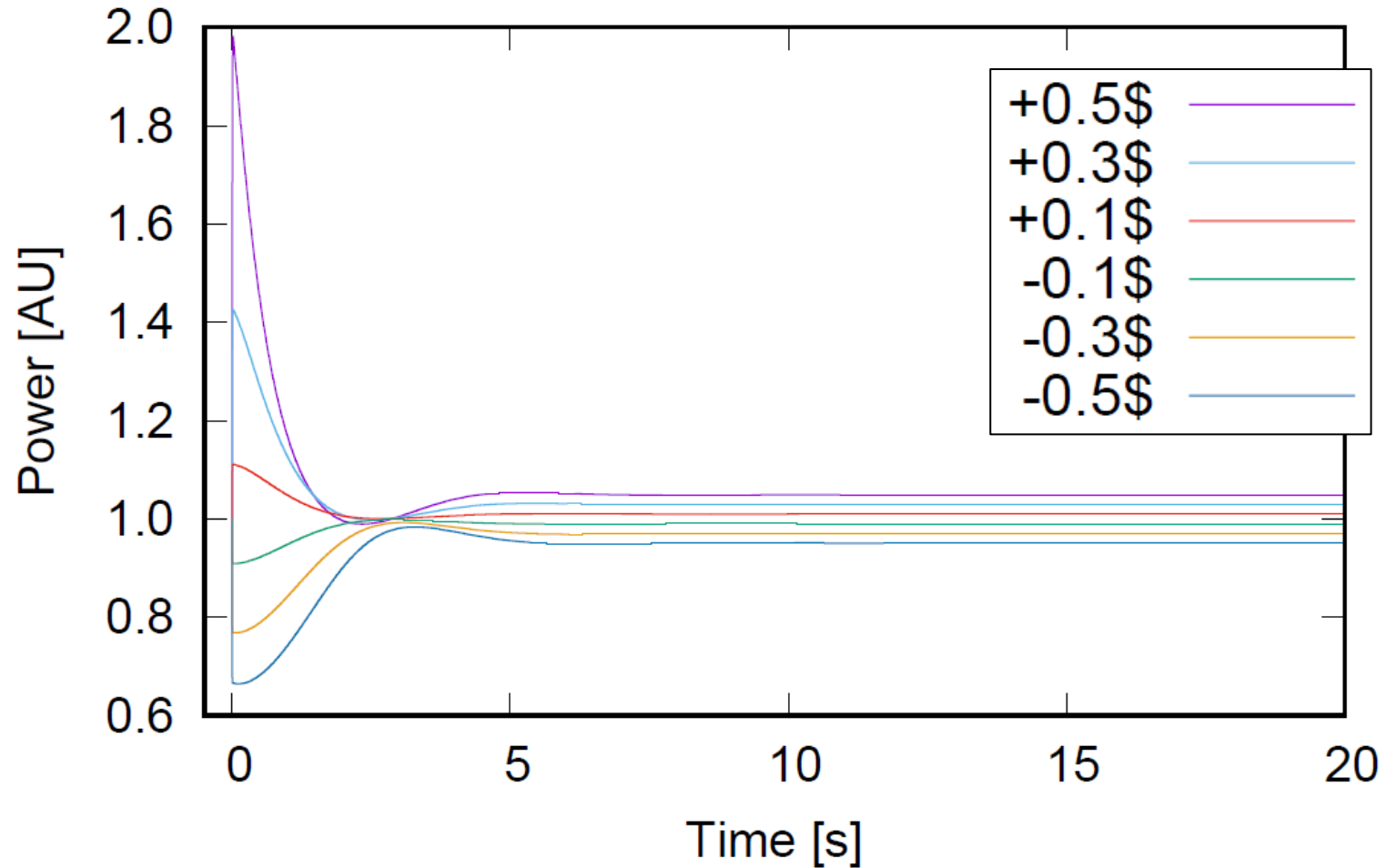
水による中性子の減速



冷却材の温度が増加すると、冷却材の密度が低下するため、中性子の減速効果が低下し、核分裂連鎖反応が抑制される（反応度が低下する）。

PWRでは、中性子吸収物質であるホウ素を冷却材に溶解させており、冷却材の密度が低下すると、ホウ素の密度も低下し、反応度が増加する効果も含まれる。これまではこの影響が比較的大きいサイクル初期(BOC)を想定した結果を示していたが、この影響が緩和されるサイクル末期(EOC)を想定した結果を以降で示す。

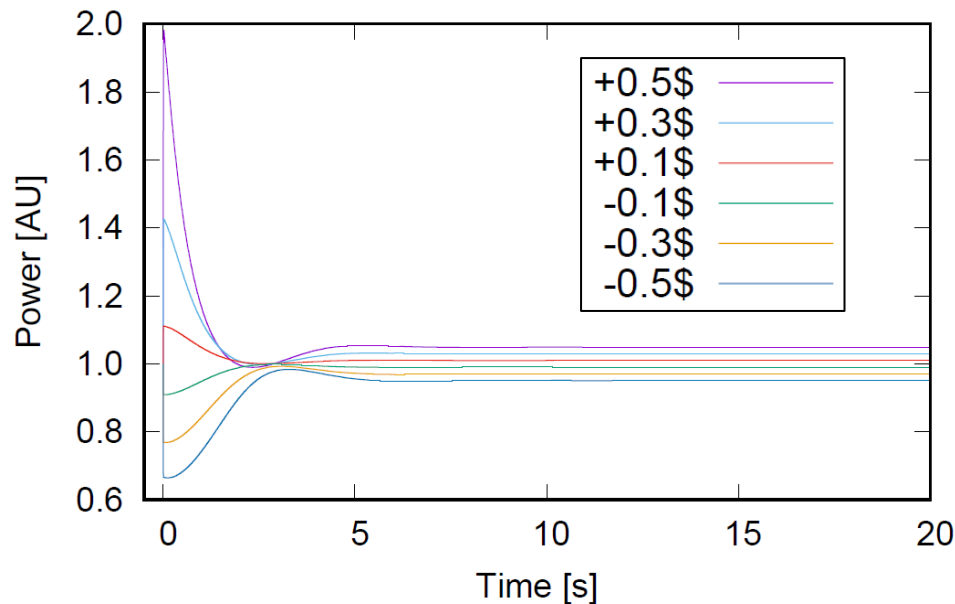
ステップ状の反応度印加 (EOC想定): 出力



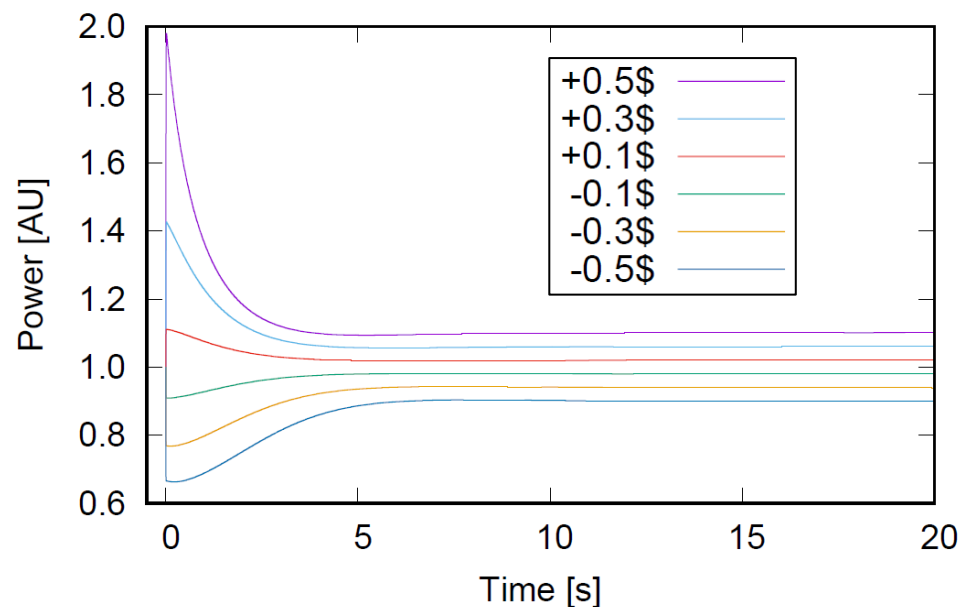
α_c を -6.0pcm/K から -94.5pcm/K としたため、冷却材温度フィードバックが強く働き、反応度印加前後の定常出力の差異が小さくなった。また、冷却材温度フィードバックの時間遅れの影響で、出力に振動が見られる。

ステップ状の反応度印加 (EOC想定): 出力

EOC想定
(冷却材温度フィードバック大)



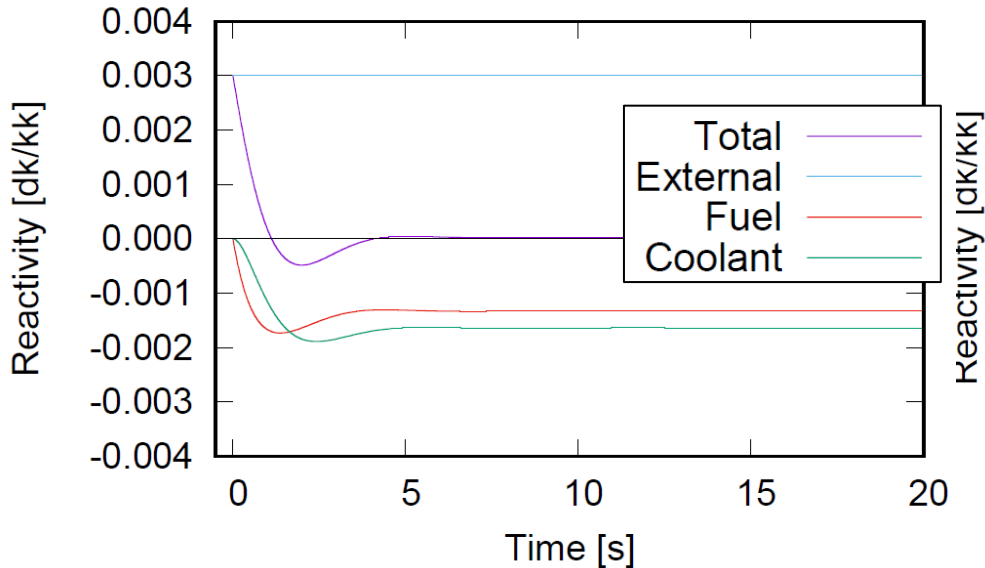
BOC想定
(冷却材温度フィードバック小)



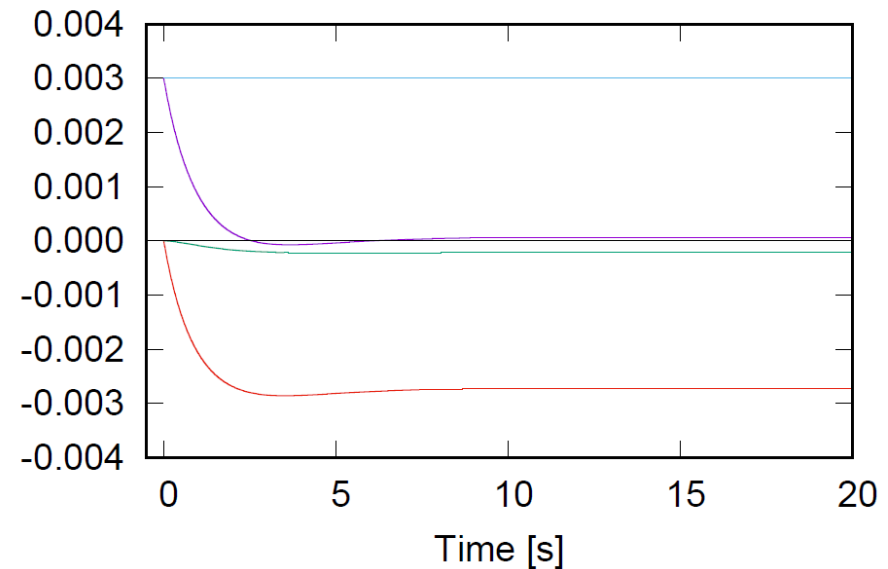
α_c を -6.0pcm/K から -94.5pcm/K としたため、冷却材温度フィードバックが強く働き、反応度印加前後の定常出力の差異が小さくなった。また、冷却材温度フィードバックの時間遅れの影響で、出力に振動が見られる。

ステップ状の反応度印加: 反応度

EOC想定
(冷却材温度フィードバック大)

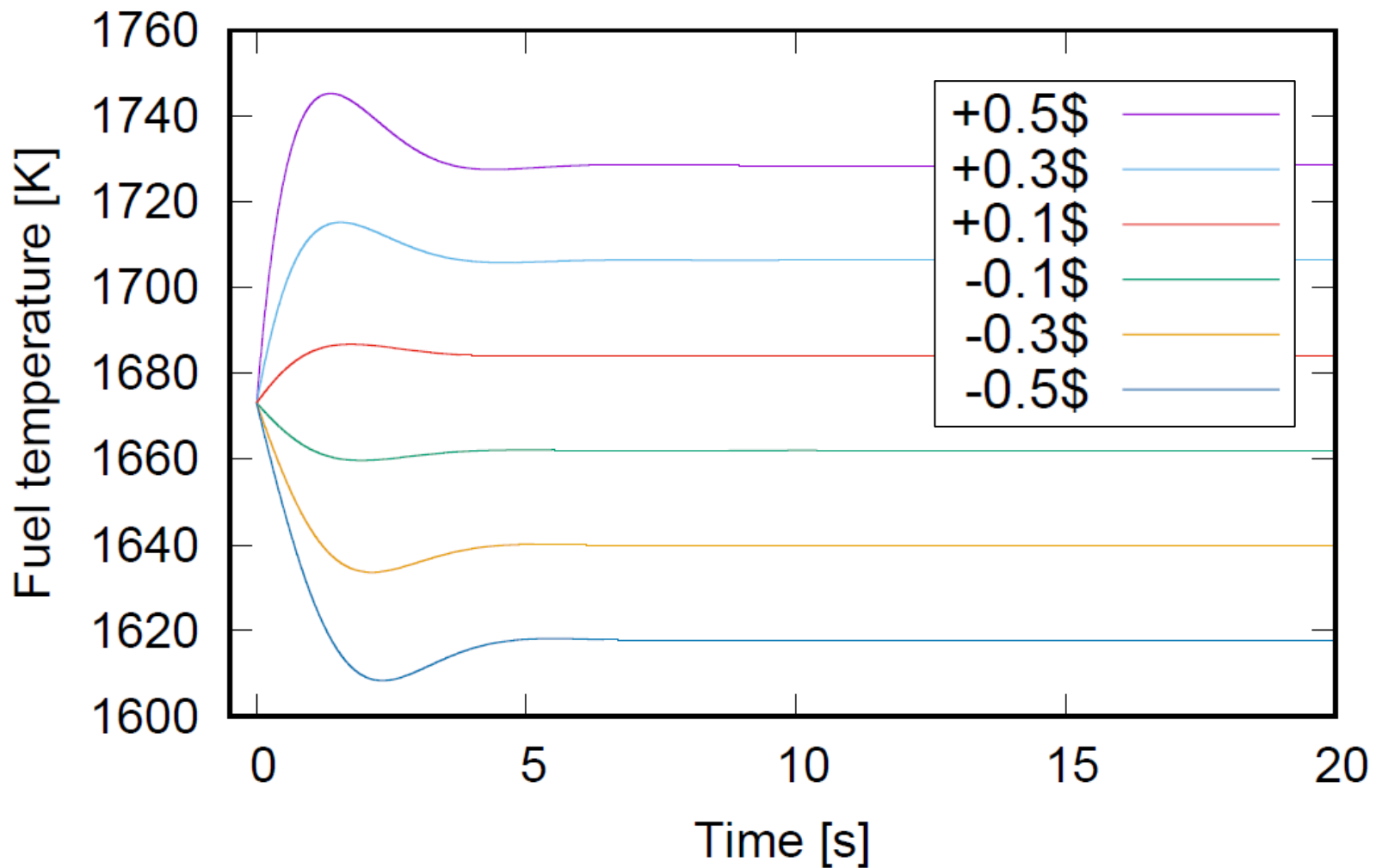


BOC想定
(冷却材温度フィードバック小)



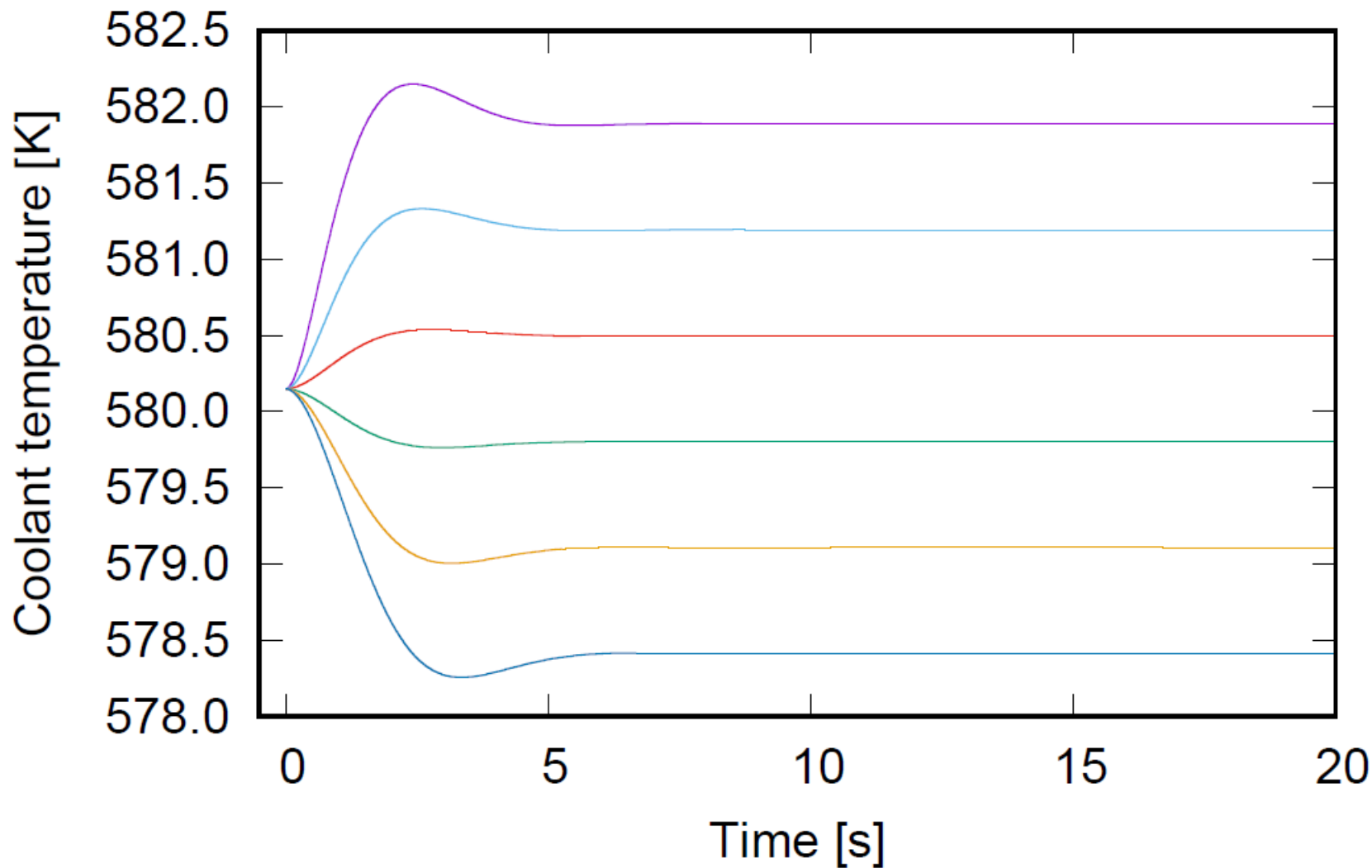
BOC想定では燃料温度フィードバック反応度が支配的であるが、EOC想定では燃料温度と冷却材温度の両フィードバック反応度が同程度に寄与している。また、後者では、燃料温度と冷却材温度のフィードバック反応度における時間差が観察される。

ステップ状の反応度印加 (EOC想定): 燃料温度



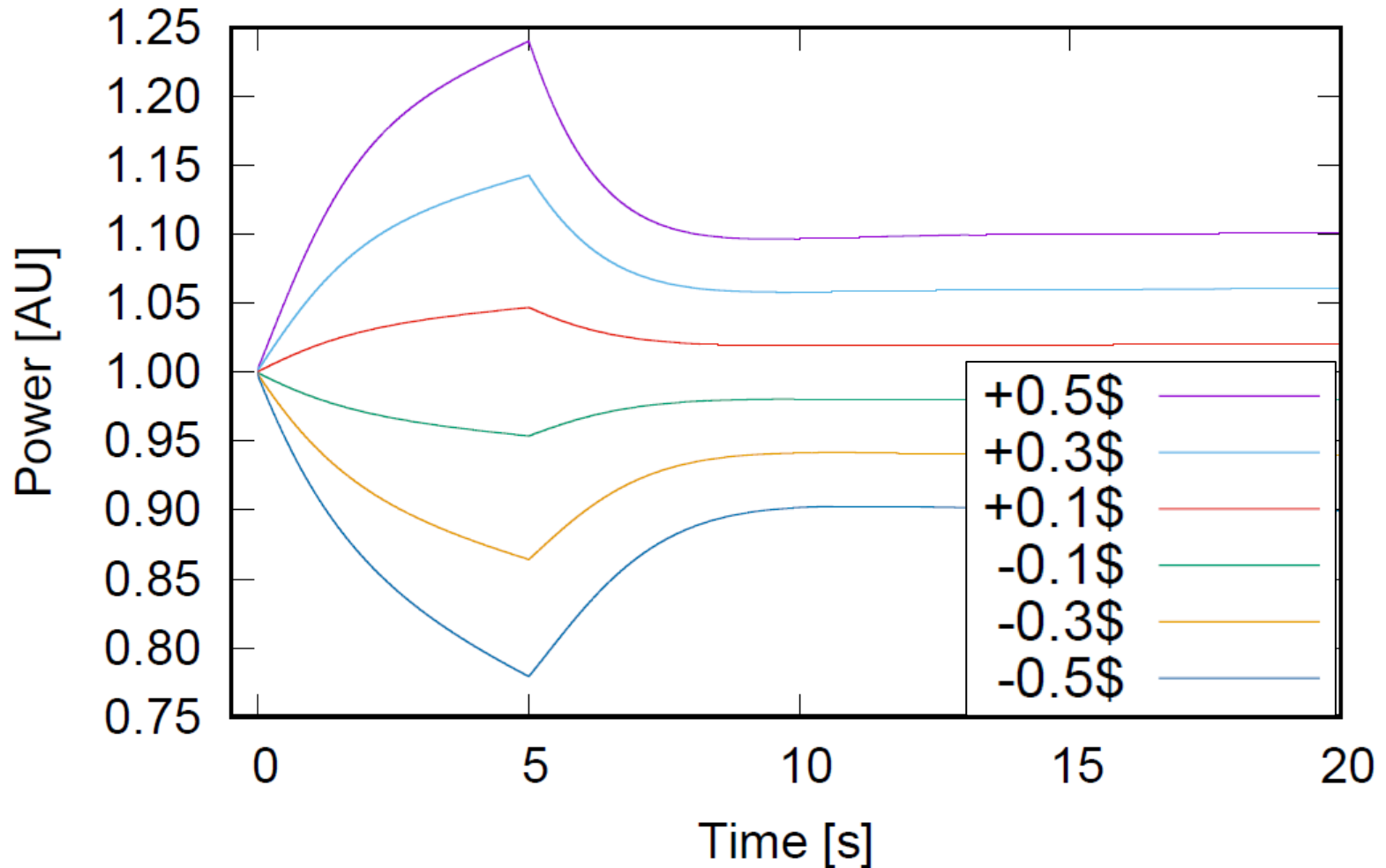
冷却材温度フィードバックの時間遅れの影響で、出力に振動が生じるため、燃料温度にも同様の振動が見られる。

ステップ状の反応度印加 (EOC想定): 冷却材温度



冷却材温度フィードバックの時間遅れの影響で、出力に振動が生じるため、冷却材温度にも同様の振動が見られる。

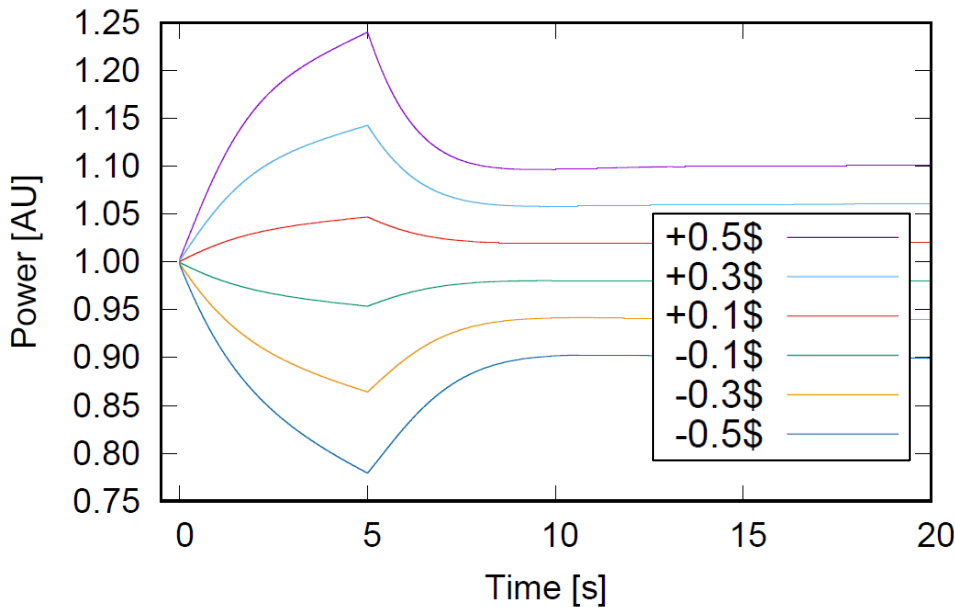
ランプ状の反応度印加: 出力



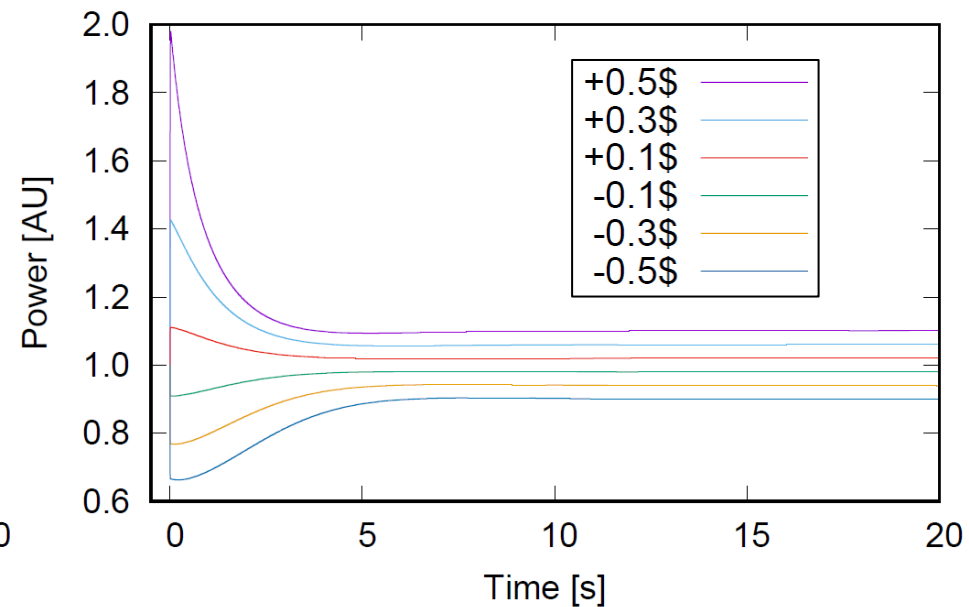
5秒間で所定の反応度を印加するため、反応度印加直後からフィードバックの影響を受け、出力変化が緩慢になる。反応度印加後の定常状態の出力レベルはステップ状印加時と変わらない。

ランプ状の反応度印加:出力

ランプ状

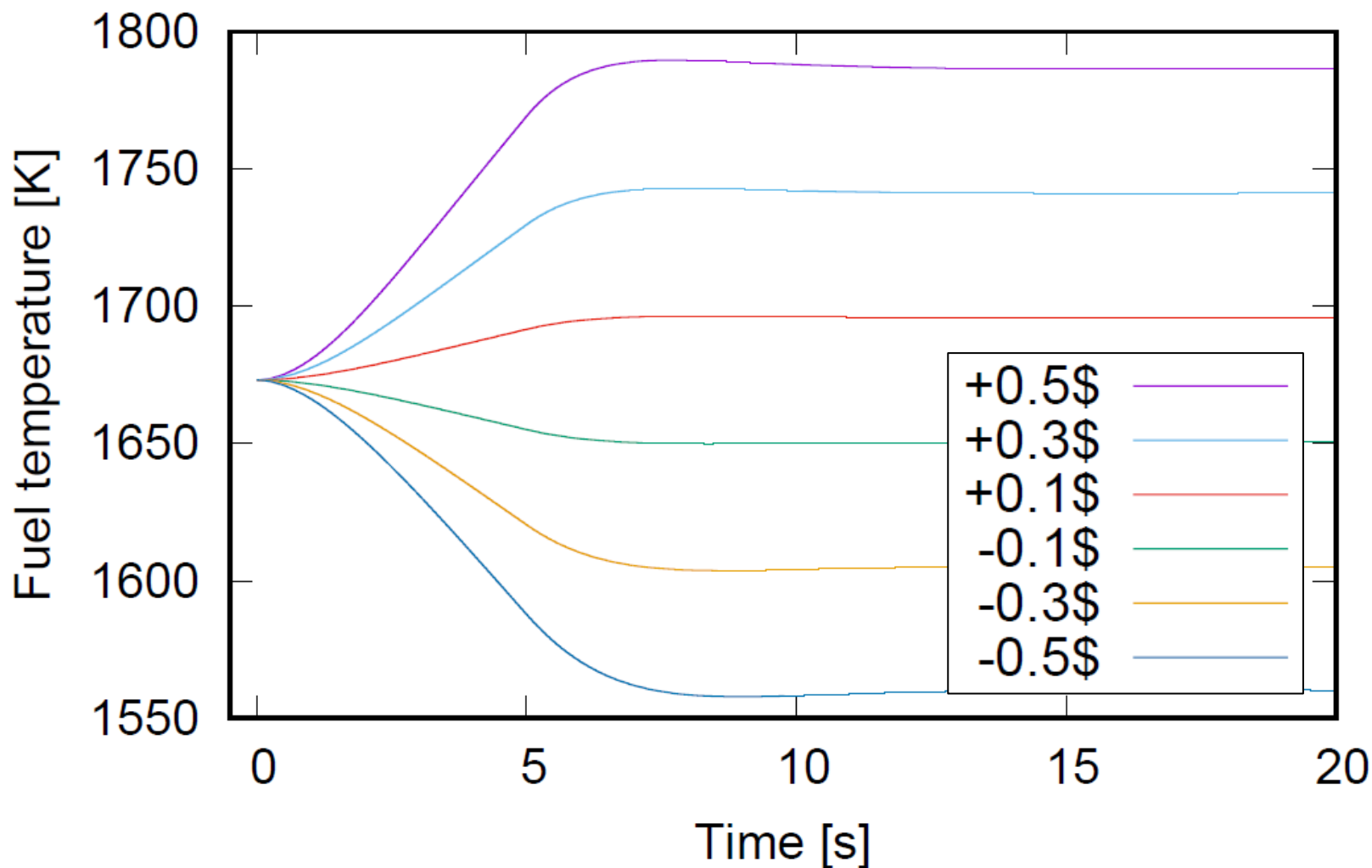


ステップ状



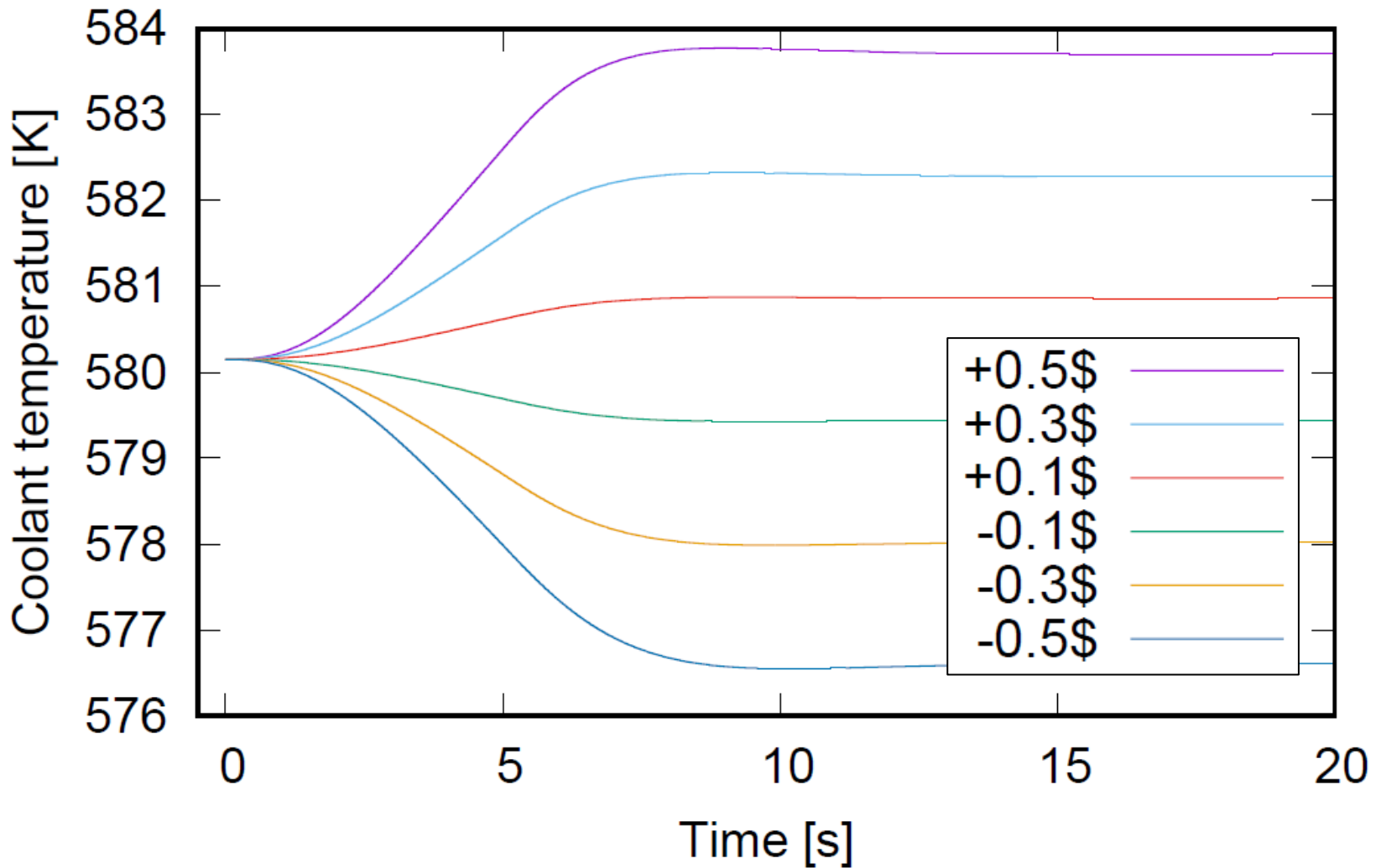
5秒間で所定の反応度を印加するため、反応度印加直後からフィードバックの影響を受け、出力変化が緩慢になる。反応度印加後の定常状態の出力レベルはステップ状印加時と変わらない。

ランプ状の反応度印加: 燃料温度



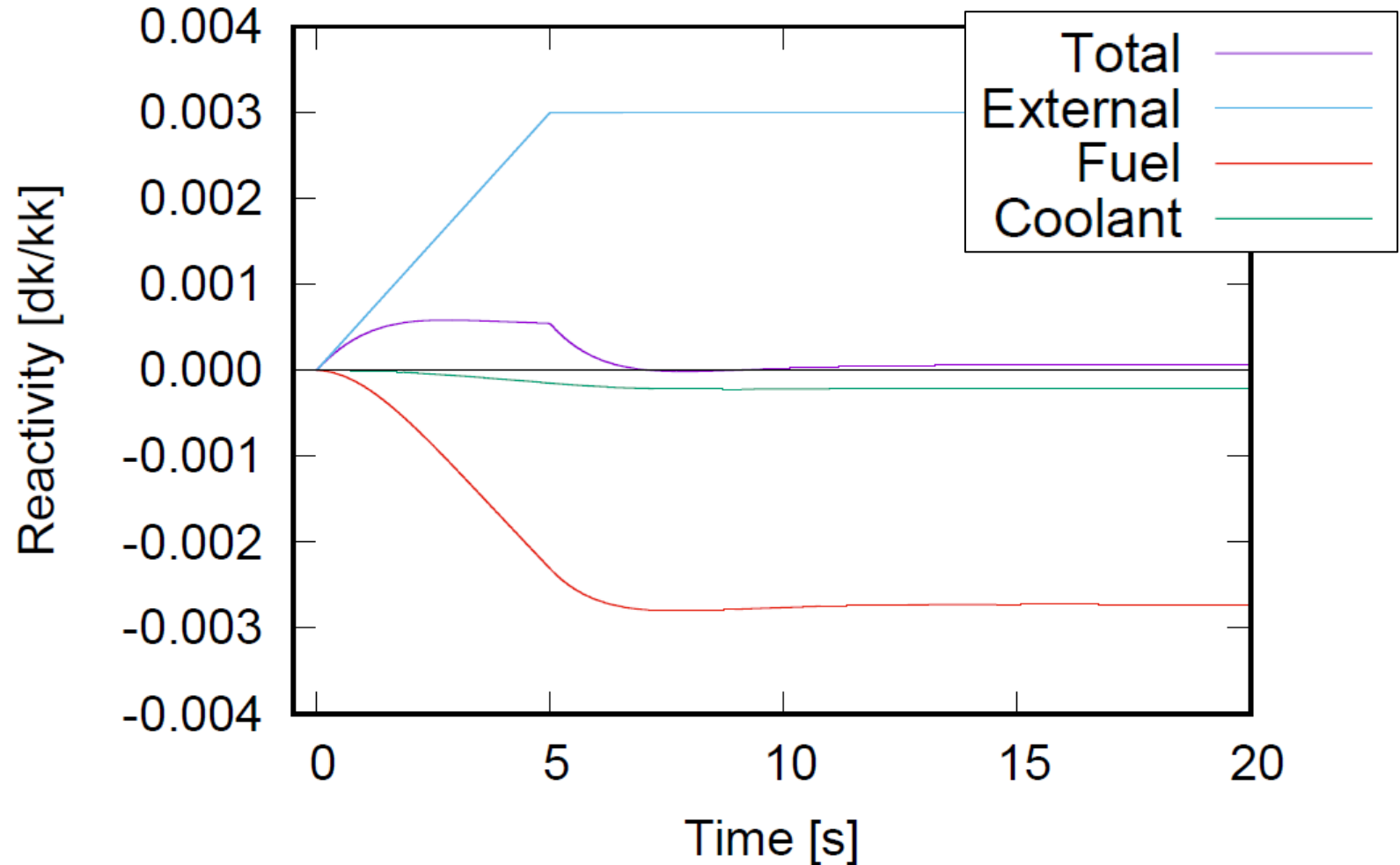
変化が緩慢になるが、反応度印加後の定常状態でのレベルはステップ状印加時と変わらない。

ランプ状の反応度印加: 冷却材温度



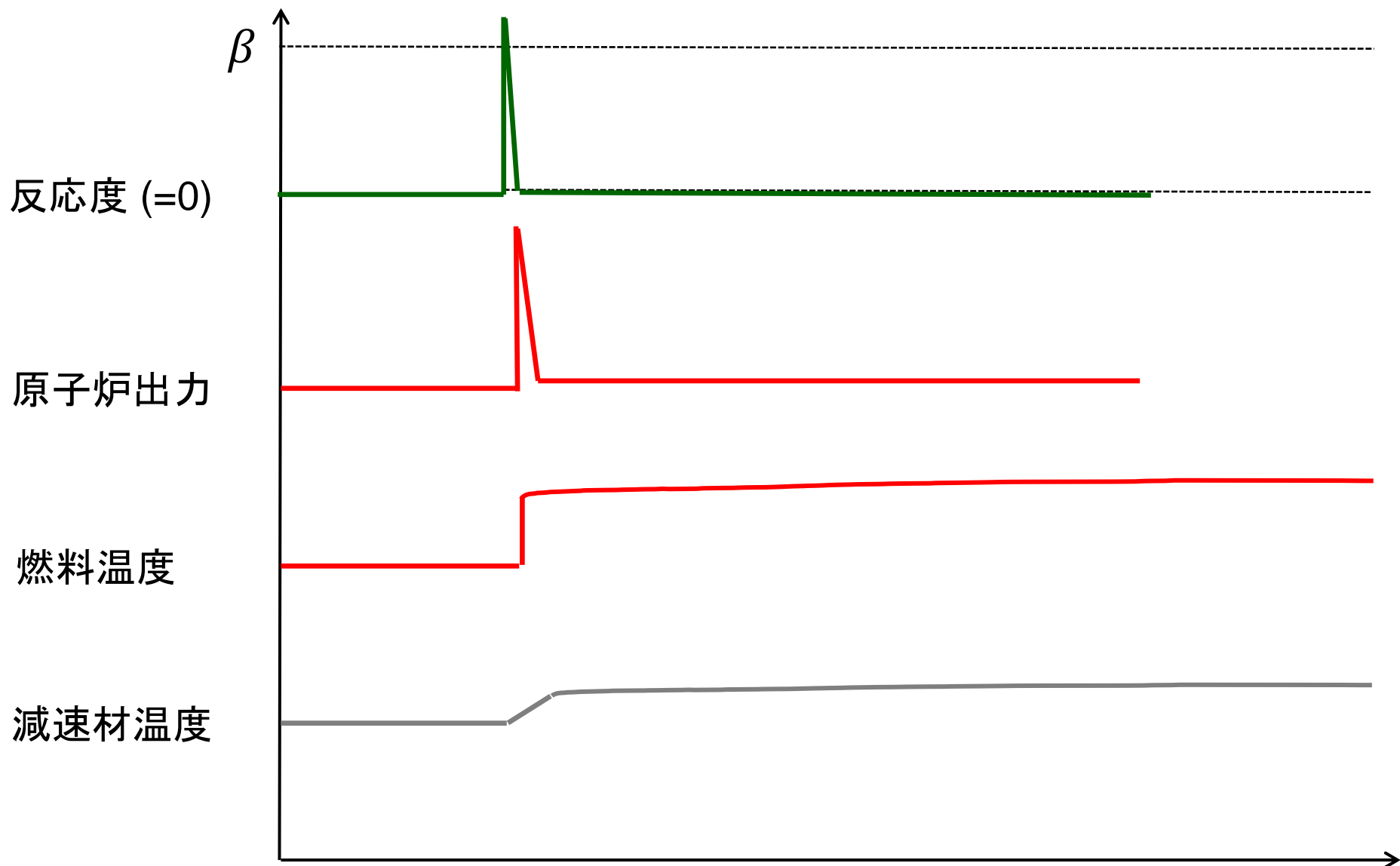
変化が緩慢になるが、反応度印加後の定常状態でのレベルはステップ状印加時と変わらない。

ランプ状の反応度印加: 反応度



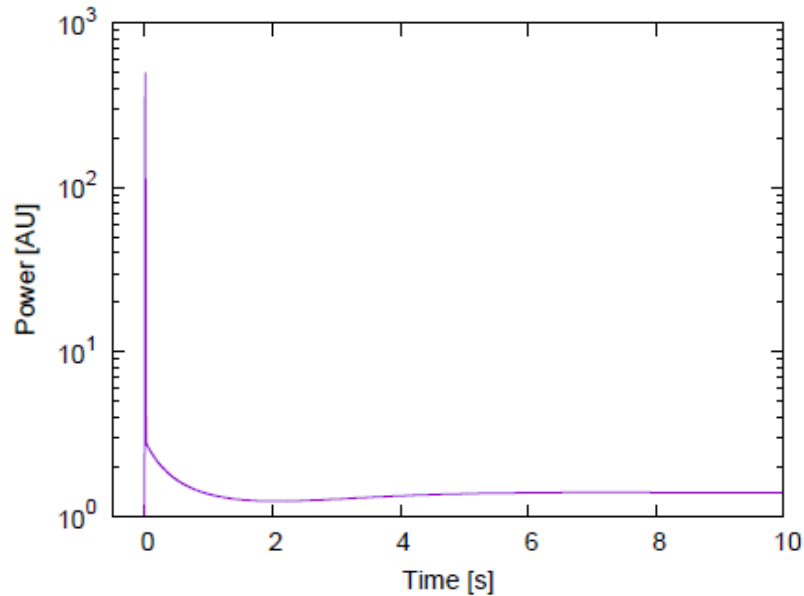
投入反応度 (0.003 dk/kk) に対して、正味の反応度の最大値は 0.001 dk/kk 未満である。

原子炉の過渡応答(フィードバック有り・即発臨界超過)

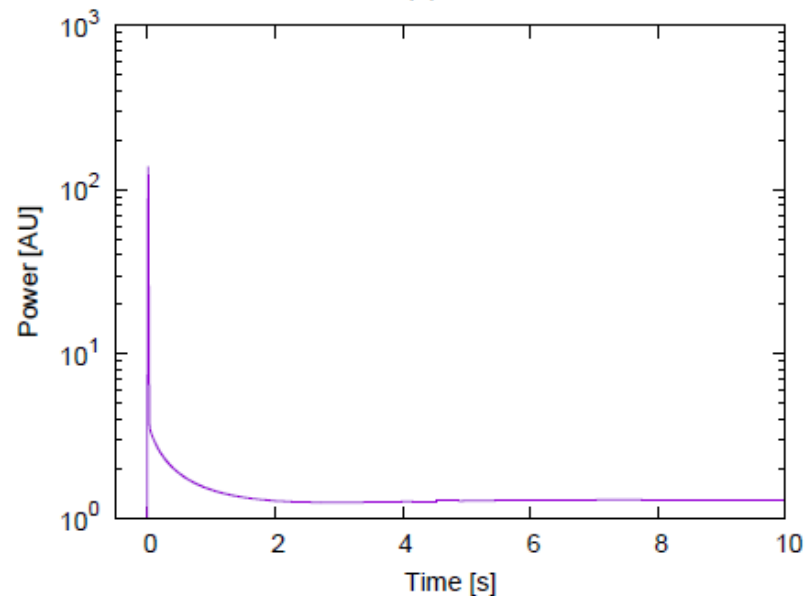


ステップ状の即発臨界を超える反応度印加: 出力

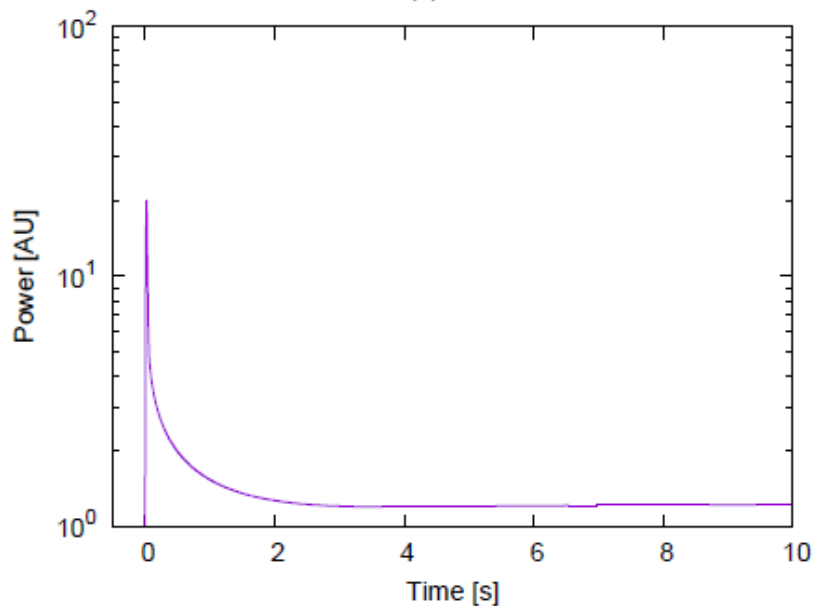
(a) 2.0\$



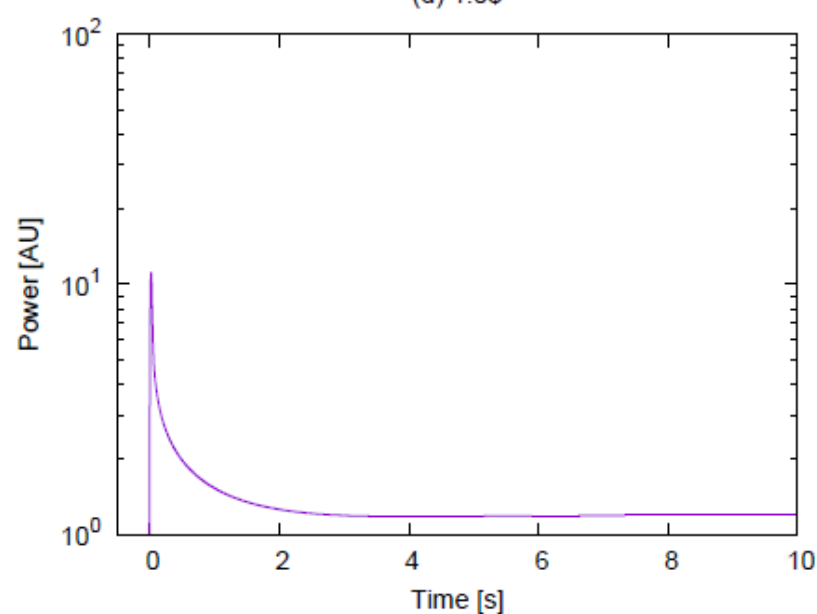
(b) 1.5\$



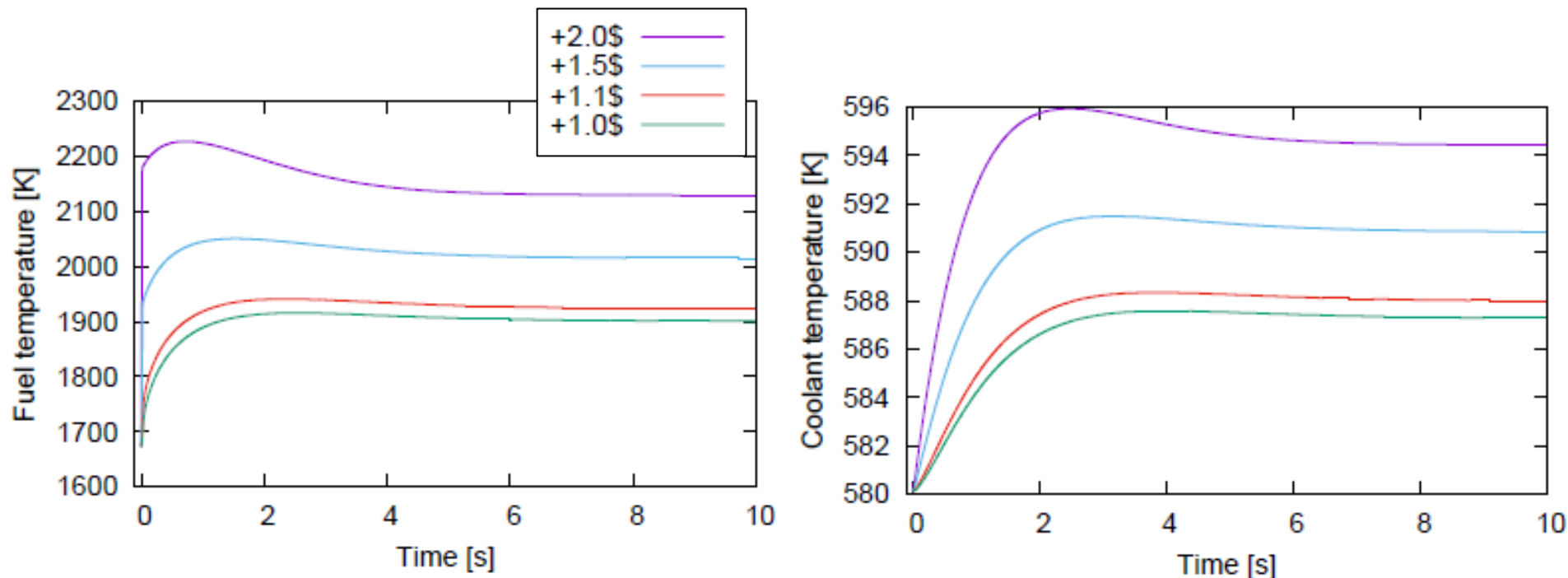
(c) 1.1\$



(d) 1.0\$



ステップ状の即発臨界を超える反応度印加: 温度



燃料温度は融点を、冷却材温度は沸点を超えずに定常状態に遷移する。

今回の評価条件では、ステップ状に2.0\$の反応度を与えられたとしても、反応度フィードバックにより、燃料・冷却材はそれぞれ相変化しないことが分かる。