3.3　反応度の異常な投入又は原子炉出力の急激な変化

3.3.1　制御棒落下

3.3.1.1　原　　因

原子炉が臨界又は臨界近傍にあるときに，制御棒駆動軸から分離した制御棒が炉心から落下し，急激な反応度投入と出力分布変化が生ずる。

3.3.1.2　事故防止対策及び事故拡大防止対策

(1)　事故防止対策

制御棒落下の発生を防止するため次のような設計及び運転管理上の対策を講ずる。

a．制御棒と駆動軸の接続部は，十分信頼性の高い構造とし，必要な場合以外に分離することがない設計とする。

b．万一，制御棒が駆動軸から分離した場合でも，制御棒が炉心内にとどまり得ない設計とする。すなわち，制御棒ブレードとチャンネルボックスの間には十分な間隙を設け，かつ，ブレードにはローラを取り付けるのでブレードとチャンネルボックスは，直接接触することはなく，その上下動は極めて滑らかである。

c．原子炉が臨界又は臨界近傍にあるときは，原子炉核計装の応答によって制御棒の移動が確認できるようにする。

d．原子炉起動時及び制御棒を大きく駆動するときには，原子炉核計装の応答によりその制御棒が確実に動いていることを確認するような運転手順を定める。

e．原子炉の運転中には，前項の方法による確認は不可能であるが，その場合には，全引き抜き位置から更に制御棒を引き抜くよう操作し，引き抜けないことを確かめることにより，制御棒と駆動軸が分離していないことを確認する。

f．制御棒引抜シーケンスは運転手順で定め，制御棒をこの運転手順に従って引き抜く。

(2)　事故拡大防止対策

上記の事故防止対策にもかかわらず，万一，制御棒落下が発生した場合には，以下の対策により事故の拡大防止を図る。

a．制御棒落下速度リミッタによって，たとえ制御棒が駆動軸から分離したとしてもその落下速度が0.95m/sを超えることがない設計とする。

b．制御棒価値ミニマイザを設け，制御棒引抜シーケンスを監視し，異常な引き抜きを阻止する。

制御棒価値ミニマイザに記憶される制御棒引抜シーケンス監視プログラムの設計基準は，臨界近接時に制御棒1本が万一落下した場合でも，その落下制御棒の最大価値を0.013Δk以下とすることとする。

なお，実際の設計では，落下制御棒の最大価値は0.010Δk以下にすることができる。

c．主蒸気管放射能高の信号で主蒸気隔離弁を自動閉止し，発電所外への核分裂生成物の放出を最小限にする。

d．中性子束高，主蒸気管放射能高等の信号により原子炉をスクラムさせる。

なお，実際には，起動・停止用蒸気式空気抽出器を作動させることにより復水器の真空を保持することができるので，「3.4.5.3　核分裂生成物の放出量及び線量当量の評価」で述べるような復水器からタービン建屋への放射性物質の漏えいが起こることはなく，核分裂生成物は気体廃棄物処理系に導かれるので大気中への放出量は無視できる程小さくな

る。

3.3.1.3　事故経過の解析[7][25][26][27]

3.3.1.3.1　９×９燃料（A型）を装荷した炉心について

(1)　解析条件

a．初期条件

解析は次の４種類の原子炉初期状態に対して行う。

(a)　サイクル初期　　低温時臨界状態

(b)　サイクル初期　　高温待機時臨界状態

(c)　サイクル末期　　低温時臨界状態

(d)　サイクル末期　　高温待機時臨界状態

サイクル初期及び末期とも，低温状態では，出力は定格の10^{-8}，燃料ペレット温度20℃で燃料エンタルピの初期値は８ｋＪ/kgUO_2であり，高温待機状態では，出力は定格の10^{-6}，燃料ペレット温度286℃で燃料エンタルピの初期値は75ｋＪ/ｋｇUO_2である。また，原子炉圧力解析における原子炉圧力の初期値は，7.03MPa[gage]である。

b．炉心流量

原子炉起動時には，通常，制御棒引き抜き開始に先立ち，冷却材を循環させ，定格の約25～30%の炉心流量を得るが，保守的に定格の20%の炉心流量があるものとする。

c．落下制御棒価値及び落下速度

落下制御棒価値は，制御棒価値ミニマイザの設計基準である0.013Δｋとし，落下速度は制御棒落下速度リミッタによって制限される0.95m/ｓとする。落下制御棒の反応度曲線を第3.3.1－1図(1)に示す。これらの反応度曲線は，制御棒価値やスクラム速度とあいまって，保守的な解析結果を与えるように設定されたものである。

d．スクラム条件

原子炉のスクラムは，最大反応度価値を有する制御棒１本が全引き抜き位置に固着して挿入されないものとする。

中性子束高スクラムは，定格出力の120%で作動するものとし，その作動遅れは0.09秒とする。スクラム反応度曲線を第3.3.1－2図(1)に示す。これらの反応度曲線は，制御棒価値やスクラム速度とあいまって，保守的な解析結果を与えるように設定されたものである。

e．安全保護系（中性子束高スクラム（中間領域モニタ））は，保守的に作動しないものとする。さらに，原子炉停止機能の観点から安全保護系（中性子束高スクラム（平均出力領域モニタ））に単一故障を仮定する。

f．逃がし安全弁については，安全弁機能より逃がし弁機能が先に作動するが，安全弁機能のみが作動すると仮定する。

g．ドップラ係数

事故に伴う原子炉出力の急上昇はドップラ効果のみで抑えられるとし，冷却材温度及びボイドの効果は考慮しない。冷却材温度及びボイドの効果を考慮すると，事故の解析結果は緩やかになる。解析に使用したドップラ係数は，添付書類八の第3.3－4図(3)に示したものと同じである。

h．ペレット－燃料被覆管ギャップ熱伝達係数

ギャップ熱伝達係数は，Ross & Stouteの関係式により計算する。

なお，燃料被覆管がその降伏応力に達したときは，その時点で，固体接触熱伝達係数は一定として取り扱う。

i．燃料被覆管－冷却材熱伝達係数

燃料被覆管と冷却材間の熱伝達係数は，以下に示す関係式を使用する。

(a) 単相強制対流　Dittus-Boelterの式

(b) 核沸騰状態　Jens-Lottesの式

(c) 膜沸騰状態

高温待機時　Dougall-Rohsenowの式

低温時　ＮＳＲＲの実測データに基づいて導出された熱伝達相関式[8]

なお，解析では，一度膜沸騰に達すると最後まで膜沸騰が持続すると仮定する。

j．限界熱条件の判定

燃料被覆管から冷却材への熱伝達が核沸騰から膜沸騰に移行する時点の判定は，以下による。

(a) 高温待機時　ＧＥＸＬ相関式でＭＣＰＲが1.07

(b) 低温時　Rohsenow-Griffithの式及びKutateladzeの式[9]

k．局所出力ピーキング係数

解析に使用する局所出力ピーキング係数は，それぞれの状態に応じて次に示す値とする。

	サイクル初期	サイクル末期
低温時	1.45	1.28
高温待機時	1.40	1.23

l．燃料被覆管は次の条件で破損するものとする。

(a) 燃料棒挙動解析に当たっては，燃料エンタルピの最大値が，「反応度投入事象評価指針」に示された燃料エンタルピを超える燃料被覆管は破損したものとし，ここでは，ペレット燃焼度40,000ＭＷｄ／ｔ未満の破損しきい値として燃料エンタルピ385ｋＪ/kgＵＯ$_2$(92cal/ｇＵＯ$_2$)とし，ペレット燃焼度40,000ＭＷｄ／ｔ以上の破損しきい値として，燃焼に伴い燃料棒内圧が上昇することも加味し「反応度投入事象評価指針」が示す燃料の許容設計限界である燃料エンタルピの最低値272ｋＪ/ｋｇＵＯ$_2$(65cal/ｇＵＯ$_2$)を用いる。

(b) ピーク出力部燃料エンタルピの増分が，以下に示す「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象における燃焼の進んだ燃料の取扱いについて」（以下「反応度投入事象取扱報告書」という。）に示されたＰＣＭＩ破損を生ずるしきい値（以下「ＰＣＭＩ破損しきい値」という。）のめやすを超える燃料被覆管は，破損したものとする。

i ペレット燃焼度25,000ＭＷｄ／ｔ未満
460ｋＪ/kgＵＯ$_2$(110cal/ｇＵＯ$_2$)

ii ペレット燃焼度25,000ＭＷｄ／ｔ以上40,000ＭＷｄ／ｔ未満
355ｋＪ/kgＵＯ$_2$(85cal/ｇＵＯ$_2$)

iii ペレット燃焼度40,000ＭＷｄ／ｔ以上65,000ＭＷｄ／ｔ未満
209ｋＪ/kgＵＯ$_2$(50cal/ｇＵＯ$_2$)

iv ペレット燃焼度65,000ＭＷｄ／ｔ以上75,000ＭＷｄ／ｔ程度まで
167ｋＪ/kgＵＯ$_2$(40cal/ｇＵＯ$_2$)

(2) 解析方法

制御棒落下の解析は，大きく分けて次の２段階の解析となる。すなわち，第１段階は，炉心の反応度変化と出力及び出力分布の変化を計算する炉心動特性解析であり，第２段階では，出力変化を入力として原子炉

圧力上昇解析及び最大出力燃料集合体の挙動解析を行う。

Ⅱ　炉心動特性は反応度投入事象解析コードＡＰＥＸ，燃料挙動解析は単チャンネル熱水力解析コードＳＣＡＴによって行う。

a．炉心動特性解析[10][11][12]

炉心動特性解析方法は，次のような前提をおく。

(a)　核的動特性解析において，出力の時間的変化は炉心一点近似とする。

(b)　核的動特性解析において，熱的現象は断熱とする。

(c)　出力の空間分布は，炉心を二次元（Ｒ－Ｚ）体系でノード区分し，拡散方程式で解く。

(d)　炉心各部分のエンタルピの上昇は，出力分布に比例する。

(e)　炉心平均エンタルピがある程度上昇する間（エンタルピステップ）は，出力分布は一定とする。

(f)　炉内のエンタルピの最大値は，エンタルピ分布のピーク値に局所出力ピーキング係数をかけて求める。

b．原子炉圧力上昇解析

原子炉圧力上昇解析は，炉心動特性解析で求めた炉心出力時間変化から蒸気発生量の計算を行い，原子炉圧力の上昇割合を求める。原子炉圧力上昇は，次のような解析モデルで計算を行う。

(a)　燃料から冷却材への熱伝達モードは，核沸騰モードが継続するものと仮定し，蒸気発生量を保守的に評価する。

(b)　冷却材に伝達された熱量は，蒸発潜熱と飽和圧力の上昇による飽和水及び飽和蒸気の温度上昇に消費する熱量に等しいとする。

(c)　炉心は高温待機状態にあり，主蒸気隔離弁は閉じているものと仮定し，圧力上昇を保守的に評価する。

c．燃料挙動解析

燃料挙動解析では，炉心動特性解析で求めた燃料集合体出力の時間変化を入力として，最大出力燃料棒の除熱計算を行い，燃料エンタルピの時間変化を求める。

使用する計算コードは，「運転時の異常な過渡変化」の解析，ＬＯＣＡ解析等で用いられている計算コード（ＳＣＡＴ）であり，これは冷却材の流動を考慮した単チャンネル熱水力解析モデルに基づくものである。

なお，制御棒落下の解析では，次の項に関して変更を行っている。

(a)　ペレット内温度計算メッシュ点数は20点とし，ペレット径を内側より５：３：２に３分割し，内側領域に４点，中間領域に５点，外側領域に11点をとり，外側領域に重点をおいて解析する。

(b)　熱伝達係数

前項で述べたギャップ熱伝達係数関係式及び低温時の膜沸騰熱伝達係数関係式を追加する。

(c)　ジルコニウム－水反応

燃料被覆管の高温化に伴う被覆材と冷却材との反応による発熱が燃料被覆管の最外周領域に起こるものとする。

(3)　解析結果

a．以上の前提を基にした制御棒落下の解析結果のうち，燃料エンタルピが最大になるサイクル初期，低温時の燃料エンタルピの時間変化を第3.3.1－3図(1)に示す。

急激な出力上昇は，ドップラ反応度の負のフィードバックにより抑えられるとともに，制御棒落下開始から約1.4秒後に平均出力領域モニタの中性子束高信号が発生して，原子炉はスクラムする。燃料エン

タルピは約4.0秒後に約701ｋＪ/kgＵＯ₂で最大となり，その後除熱により低下する。

その他の原子炉初期状態を含めた制御棒落下の解析結果を以下の表にまとめる。

	サイクル初期		サイクル末期	
	低温時	高温待機時	低温時	高温待機時
燃料エンタルピの最大値（ｋＪ/kgＵＯ₂）	約701	約640	約695	約630
ピーク出力部燃料エンタルピ（ｋＪ/kgＵＯ₂）	約401	約452	約425	約469
破損燃料棒割合（%）	約3.5	約3.8	約2.8	約5.4

b．燃料エンタルピの最大値は，いずれの場合も「反応度投入事象評価指針」に示される963ｋＪ/kgＵＯ₂(230cal/ｇＵＯ₂)から，燃焼に伴う融点低下分に相当するエンタルピ約105ｋＪ/kgＵＯ₂及びガドリニア添加に伴う融点低下分に相当するエンタルピ約21ｋＪ/kgＵＯ₂を差し引いた837ｋＪ/kgＵＯ₂を下回っている。また，原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力は，非常に保守的に見積もっても，約8.46MPa[gage]である。

c．炉心の全燃料棒に対する破損燃料棒割合は，サイクル末期，高温待機時に最大となり，約5.4%である。

サイクル末期，高温待機時の燃料エンタルピヒストグラムを第3.3.1－4図(1)に示す。

d．浸水燃料の影響については，炉心規模，ピーク出力部燃料エンタルピ，原子炉停止余裕及び落下制御棒価値が「反応度投入事象評価指針」添付２に示される浸水燃料に係わる基準の適用除外条件を満たしていることから，同指針添付２の影響評価に包含される。

さらに，ＰＣＭＩ破損に伴う機械的エネルギの影響についても同様に，炉心規模，ピーク出力部燃料エンタルピ，原子炉停止余裕及び落下制御棒価値が「反応度投入事象取扱報告書」添付４に示されるＰＣＭＩ破損時の機械的エネルギの影響評価の適用除外条件を満たしていることから，同報告書添付４の影響評価に包含される。

e．原子炉は，スクラム後，主蒸気管放射能高で主蒸気隔離弁が自動閉止するので，原子炉スクラム（主蒸気隔離弁閉）時の原子炉停止手順に従い，減圧・降温を行い，冷態停止状態に移行することができる。

3.3.1.3.2　９×９燃料（Ｂ型）を装荷した炉心について

(1)　解析条件

a．初期条件

解析は次の４種類の原子炉初期状態に対して行う。

(a)　サイクル初期　　低温時臨界状態

(b)　サイクル初期　　高温待機時臨界状態

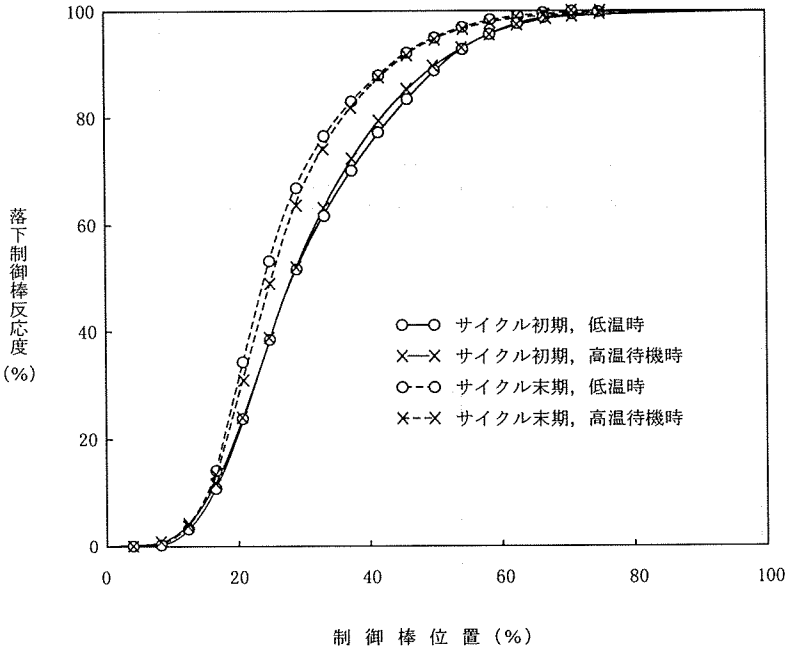
(c)　サイクル末期　　低温時臨界状態

(d)　サイクル末期　　高温待機時臨界状態

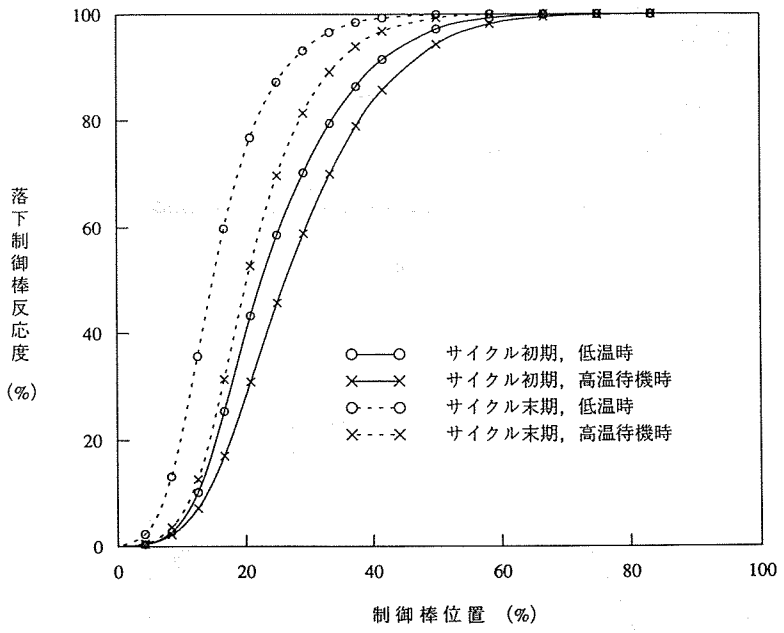
サイクル初期及び末期とも，低温状態では，出力は定格の10^{-8}，燃料ペレット温度20℃で燃料エンタルピの初期値は８ｋＪ/kgＵＯ₂であり，高温待機状態では，出力は定格の10^{-6}，燃料ペレット温度286℃で燃料エンタルピの初期値は75ｋＪ/ｋｇＵＯ₂である。また，原子炉圧力解析における原子炉圧力の初期値は，7.03MPa[gage]である。

b．炉心流量

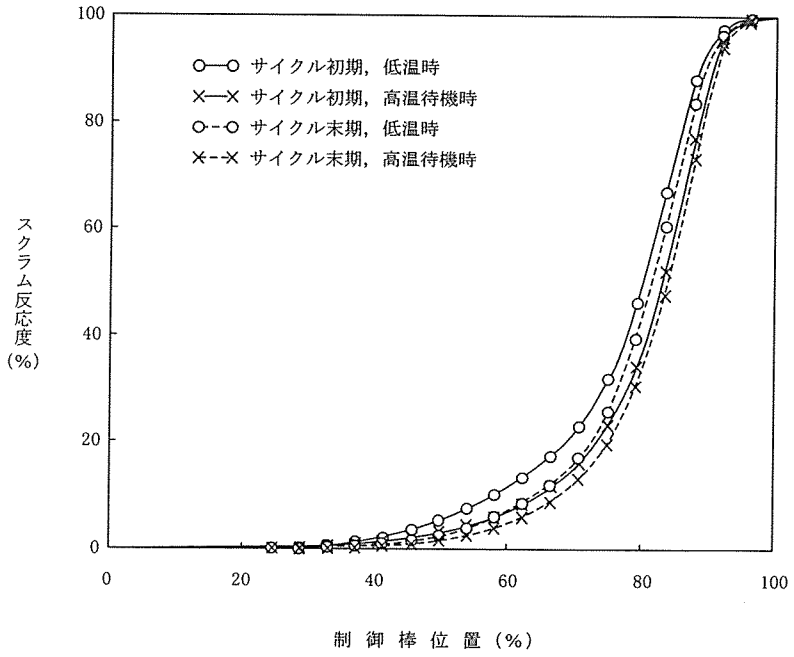
原子炉起動時には，通常，制御棒引き抜き開始に先立ち，冷却材を



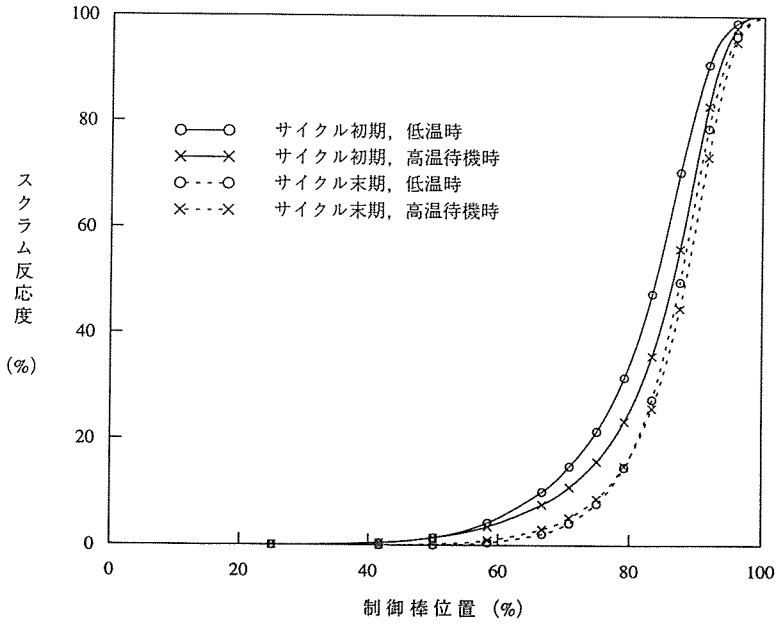
第3.3.1－1図(1)　落下制御棒反応度曲線
（９×９燃料（A型））



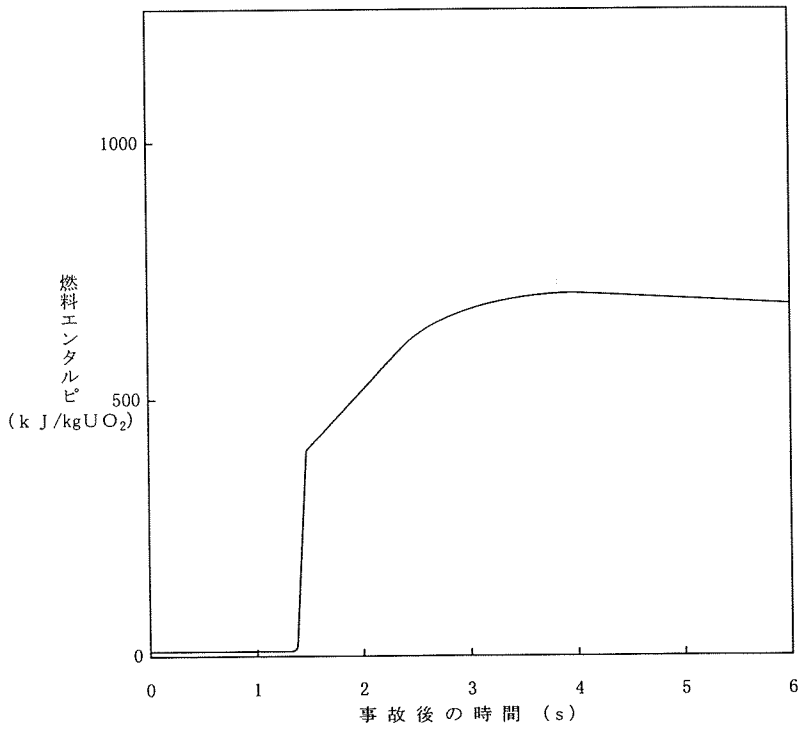
第3.3.1－1図(2)　落下制御棒反応度曲線
（９×９燃料（B型））



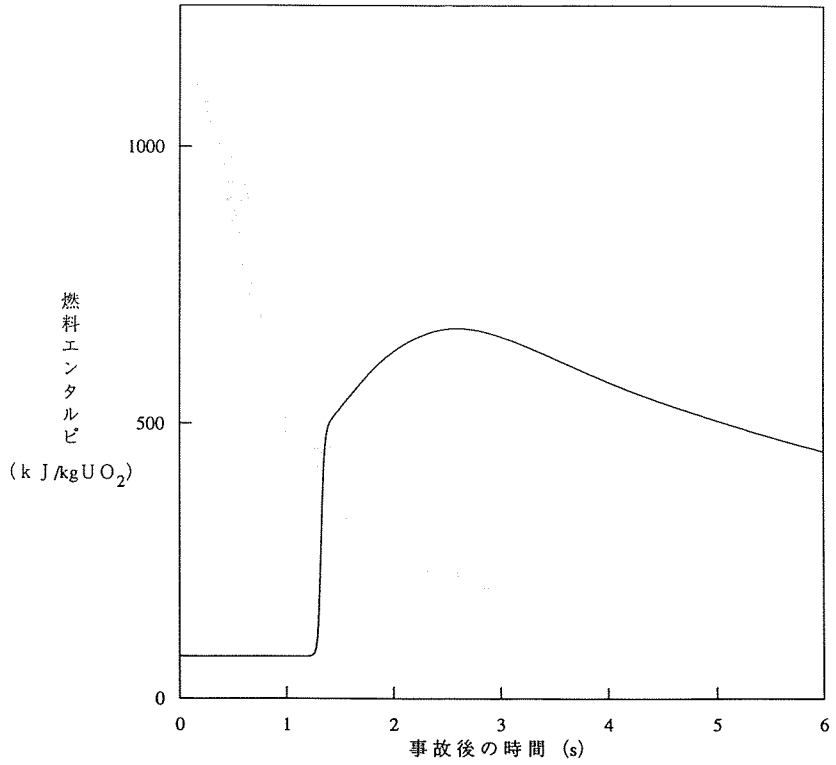
第3.3.1－2図(1)　スクラム反応度曲線
（９×９燃料（A型））



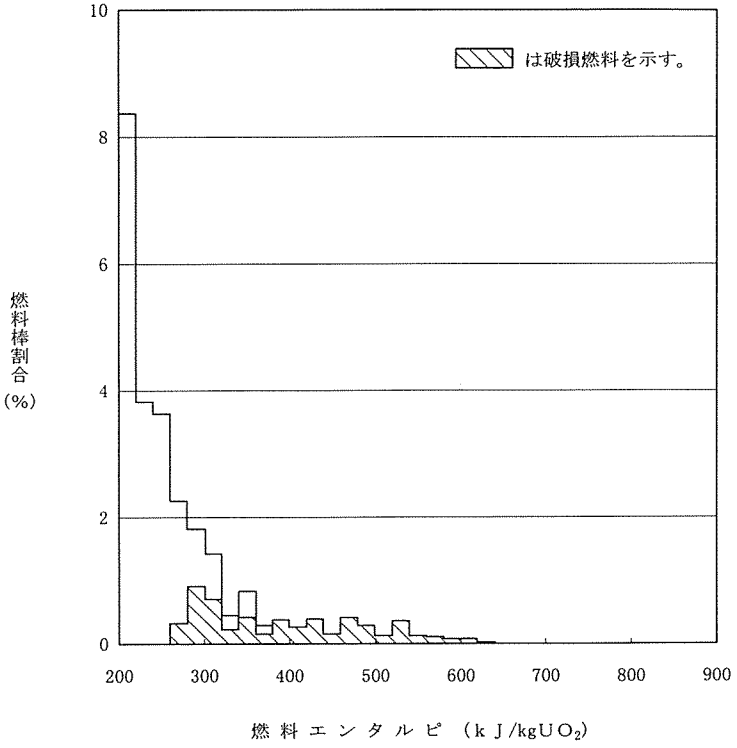
第3.3.1－2図(2)　スクラム反応度曲線
（９×９燃料（B型））



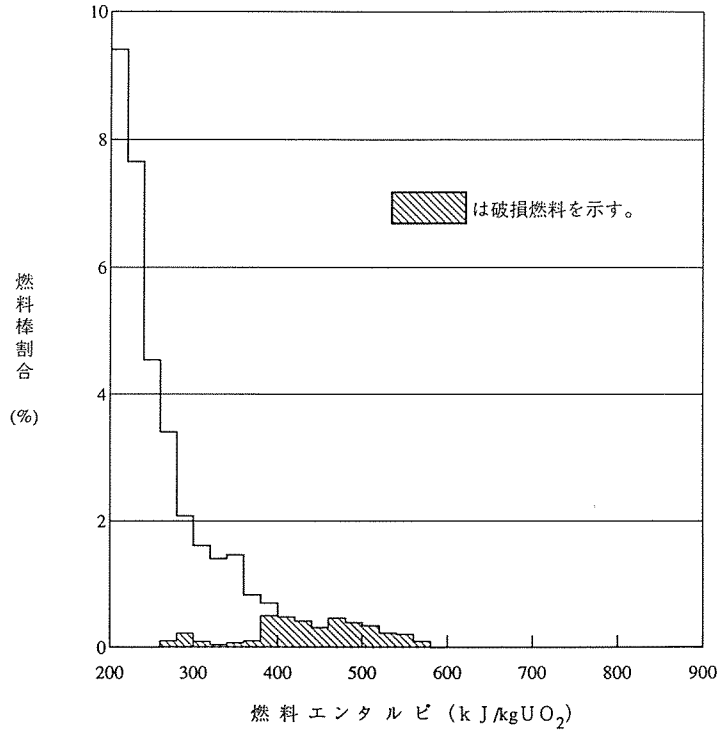
第3.3.1－3図(1)　制御棒落下時の燃料エンタルピの変化
(サイクル初期，低温時，９×９燃料（A型））



第3.3.1－3図(2)　制御棒落下時の燃料エンタルピの変化
(サイクル初期，高温待機時，９×９燃料（B型））



第3.3.1－4図(1)　制御棒落下時の燃料エンタルピヒストグラム
(サイクル末期，高温待機時，９×９燃料（A型））



第3.3.1－4図(2)　制御棒落下時の燃料エンタルピヒストグラム
(サイクル末期，高温待機時，９×９燃料（B型））