

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. 20 [技術情報室]

第三開発室FBRライン連続焼結炉の 台板(スキッド)競り上がり事象の解析

1994年3月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001



第三開発室 F B R ライン連続焼結炉の 台板（スキッド）競り上がり事象の解析

実施責任者 大 島 博 文 *

報 告 者 今 野 広 一 *

要 旨

平成 5 年 6 月 7 日午前 5 時 4 0 分頃、プルトニウム燃料第三開発室において発生した連続焼結炉の作動不良については、炉内状況の観察の結果、台板の競り上がりによるヒーターの断線と台板の押し出し不能によることが判明した。

この台板の競り上がりが発生する条件の検討及び Mo 製ヒーターが設定された押し出し力のもとで切断される可能性について解析を行った。当初から設定されていたトルクリミッター値で発生する台板への押し出し力で台板が競り上がるためには、

- ①台板を押し出す方向の反対側が固定されていること。
- ②炉床の台板進行方向の水平線に対し、あらかじめ台板が傾いていること（臨界角度の存在）。

が必要である。炉床と台板の隙間に落下した異物（ペレット）等による臨界角度以上の傾きがなければ、トルクリミッター設定値内で競り上がりは発生しない。

Mo 製ヒーターの引張強さは、常温で大きな値であるが、1700° C での引張強さと剪断応力の計算結果から剪断力の方が引張強さより大きい。

再発防止対策の一つとしてトルクリミッター設定値の妥当性確認のためにモーター部とメインプヤー部を繋ぐチェーンに歪みゲージを設置し、発生する応力を記録している。その測定結果によると最大応力は約 150kgf を示している。メインプヤーに働く力 $F = 150 \cdot (170/60) = 425 \text{ kgf}$ から、本解析で求めた 591 kgf より小さな値である。これは摩擦係数が想定した値より若干小さく、かつ実績では 22 スキッド全てにペレットが装荷されていないことによるものと言える。

*プルトニウム燃料工場 管理課

目 次

I	連続焼結炉のスキッドが持ち上がる条件	
1.	目的	1
2.	検討内容	1
3.	検討結果	2
4.	補足	2
II	連続焼結炉のスキッドが持ち上がる条件（その2）	
1.	目的	1
2.	検討内容	1
3.	検討結果	2
III	スキッド及びペレットが持ち上がる条件	
1.	目的	1
2.	検討内容	1
3.	検討結果	2
IV	焼結炉ヒーターの切断条件の確認	
1.	目的	1
2.	検討内容	1
3.	検討結果	2

連続焼結炉のスキッドが持ち上がる条件

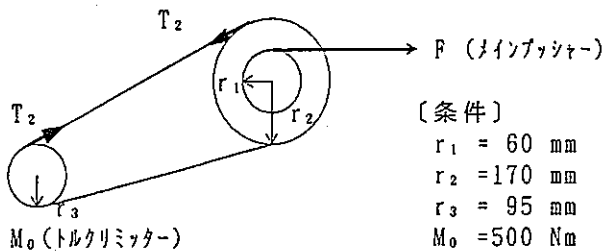
平成 5年 6月17日
 プルトニウム燃料工場管理課

1. 目的

500 Nmのトルクリミッター設定値で操作した場合に、連続焼結炉のスキッドが持ち上がり、ジャミングを発生させる条件を検討する。

2. 検討内容

1) トルクリミッターの設定値でメインプッシャーにかかる力



〔条件〕
 $r_1 = 60 \text{ mm}$
 $r_2 = 170 \text{ mm}$
 $r_3 = 95 \text{ mm}$
 $M_o = 500 \text{ Nm}$

トルクリミッターの設定値（約10%の範囲で調整可能）で作動した場合に発生するメインプッシャーの力を求める。

$$M_o = T_2 \cdot r_3$$

$$F = T_2 \cdot (r_2 / r_1)$$

$$= (M_o / r_3) \cdot (r_2 / r_1)$$

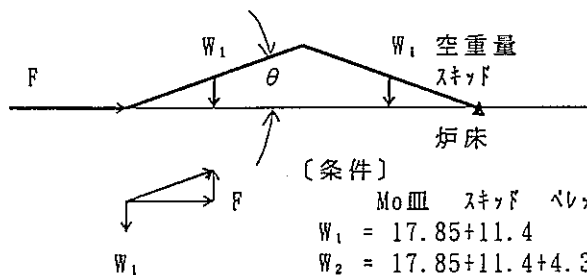
$$= (500 / 0.095) \cdot (170 / 60)$$

$$= 14912 \text{ N}$$

$$= 1521.6 \text{ kgf}$$

図1 プッシャー機構図

2) スキッドが持ち上がるための臨界角度



〔条件〕
 M_o スキッド ペレット
 $W_1 = 17.85 + 11.4 = 29.25 \text{ kg}$
 $W_2 = 17.85 + 11.4 + 4.32 = 33.57 \text{ kg}$

スキッドが持ち上がる臨界角度 θ は、

$$W_1 < F \cdot \tan \theta$$

$$\tan \theta > W_1 / F$$

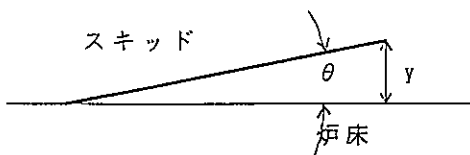
$$= 29.25 / 1521.6$$

$$= 0.01922$$

$$\therefore \theta > 1.10^\circ$$

1.10°以上の角度になった場合、スキッドはプッシャーの押す力により持ち上がる。

3) 臨界角度を達成する高さ



〔条件〕

スキッド寸法 (mm)
 $280 \text{ L} \times 258 \text{ W} \times 30 \text{ H}$

$$y = 280 \cdot \sin \theta$$

$$= 5.38 \text{ mm}$$

5.38 mm以上にスキッド端が持ち上がるとジャミングがトルクリミッターの応力で発生する。

図3 スキッドの持ち上げ高さ

〔参考〕	・もんじゅペレット外径	5.4 mm
	高さ	~8 mm
	・常陽ペレット外径	4.63 mm
	高さ	~8 mm

3. 検討結果

空スキッドが 500 Nm のトルク力で持ち上げるに必要な臨界角度及びその持ち上げ高さの検討を行った。臨界角度以上にならないければ、500 Nmのトルク力で空スキッドを持ち上げることが不可能なことから、その臨界角度まで持ち上げる要因を突き止めることが必要である。

臨界角度から求められるスキッド端での炉床からの高さは、5.38 mmである。この高さまで持ち上げる原因は、スキッドの応力以外から求めなければならない。

その要因としては、①炉床のレンガに段差が出来たことによる場合、②天井部分のレンガ等が炉床面に落下した場合、③ペレットが床面に落下した場合等が考えられる。

計算で求めたスキッド端部での臨界高さが 5.38 mmと、もんじゅペレット外径5.4 mmに近いことから、そのきっかけは、もんじゅペレットがスキッドとスキッドの接触面の左右の端部付近とスキッドの側面ガイド部の間に落下し、スキッドに乗り上げたことが原因となった可能性は否定できない。この場合、ペレットの落下防止対策が重要事項となる。

4. 補足

空スキッドでは無く、ペレットの入っているスキッドが持ち上がる条件を検討してみる。

$$\begin{aligned}\tan \theta &> W_2 / F \\ &= 33.57 / 1521.6 \\ &= 0.02206 \\ \therefore \theta &> 1.26^\circ \\ y &> 280 \cdot \sin \theta \\ &= 6.16 \text{ mm}\end{aligned}$$

となり、万一もんじゅペレットが水平にスキッド端面に挟まってもペレット入りスキッドが最初に持ち上がる可能性はほとんど無い。

もんじゅペレットを端面に挟んでも、空スキッドが持ち上がらないためのトルクの値を求める。スキッド端面で5.6 mm上昇しても、スキッドが持ち上がらない条件は、

$$\begin{aligned}y &= 5.6 < 280 \cdot \sin \theta \\ \sin \theta &> 5.6 / 280 \\ &= 0.020 \\ \theta &> 1.15^\circ \\ W_1 / \tan \theta &> F \\ 29.25 / 0.02007 &= 1457.4 > F \\ F &= T_2 \cdot (r_2 / r_1) \\ T_2 &= F \cdot (r_1 / r_2) \\ &= 1457.4 \times 9.8 \times 60 / 170 \\ &= 5041 \text{ N} \\ M_0 &= T_2 \cdot r_3 \\ &= 5041 \times 0.095 \\ &= 479 \text{ Nm}\end{aligned}$$

479 Nm のトルク以下に設定しておくのが望ましい。

定常時に発生するトルクを、22スキッドの全てにペレットが装荷されているとして評価してみると、

①	メインプッシャー荷重 F	μ_s : Mo-SUS 摩擦係数 1.28
		μ_1 : Mo-Al ₂ O ₃ 摩擦係数 0.4
	$F = \mu_s W_a + \mu_1 W_b + \mu_s W_c$	W_a : 3 skids on SUS
	$= 33.57 \times (1.28 \times 10 + 0.4 \times 12)$	W_b : 12 skids on Al ₂ O ₃

$$\begin{aligned}
 &= 591 \text{ kgf} \\
 &= 5791 \text{ N}
 \end{aligned}$$

W_c : 7 skids on SUS

② モーターに加わる荷重 M_3

$$\begin{aligned}
 T_2 &= F \cdot (r_1 / r_2) \\
 &= 5791 \times 60 / 170 \\
 &= 2044 \text{ N} \\
 M_3 &= T_2 \cdot r_3 \\
 &= 2044 \times 0.095 \\
 &= 194 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

③ トルクリミッターの余裕比 η

$$\begin{aligned}
 \eta &= M_0 / M_3 \\
 &= 479 / 194 \\
 &= 2.46
 \end{aligned}$$

となり、全スキッドにペレットが装荷されていても、プッシャーの駆動に必要なトルクは確保されていると判断される。従って、トルクリミッターの設定値を、500 Nmより約5%下げた、479 Nm にすることが、ジャミング発生防止に対し、効果が有ると判断される。

以上

連続焼結炉のスキッドが持ち上がる条件 (その2)

平成 5年 6月18日
プルトニウム燃料工場管理課

1. 目的

500 Nmのトルクリミッター設定値で操作した場合に、連続焼結炉のスキッドが持ち上がり、ジャミングを発生させる条件を検討する。

2. 検討内容

前回検討で、スキッドを停止させる要因ともんじゅペレットがスキッド端部付近に落下してスキッドが乗り上げる2条件が成立するならば、500 Nmのトルク力で空スキッドは持ち上がる可能性があることを導いた。今回は、ペレット以外の要因でジャミングが発生する可能性についての検討を継続して行う。

1) スキッド端面の直角度が出ていない場合にスキッドに乗り上げる可能性について

スキッド端面の直角度が出ていないため、他のスキッドに乗り上げる可能性について検討を行う。静力学的解析結果からは、前回の解析より臨界角度 $\theta > 1.10^\circ$ を求めているが、スキッド端面の斜面をずりあがるとした場合の角度を求める。

斜面の摩擦は、機械工学便覧の第5章摩擦で示すように、物体を傾斜角 α の斜面に沿って引き上げに要する水平力 F は、

$$F > W_1 \cdot \tan(\lambda + \alpha)$$

λ : 運動摩擦角

μ : Mo摩擦係数 1.28

$$\mu = \tan \lambda$$

$$F = 1521.6 > 29.25 \times \tan(\lambda + \alpha)$$

$$\tan(\lambda + \alpha) < 52.02$$

$$\therefore \lambda + \alpha < 88.9^\circ$$

$$1.28 = \tan \lambda$$

$$\lambda = 52.0^\circ$$

$$\therefore \alpha < 36.9^\circ$$

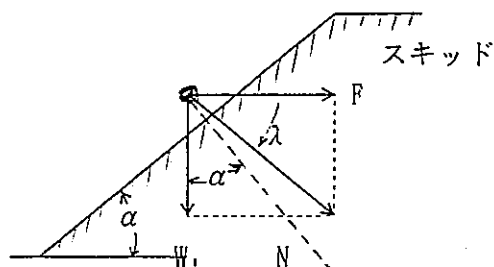


図1 斜面の摩擦

となり、スキッド端面の斜面を摩擦力に抵抗して持ち上がる可能性は無い。

図2に示すように、静力学的に2枚のスキッドが臨界角 θ からしばらくの間、力学的平衡状態で持ち上がるの方が容易に起こる。この場合、 $\lambda = 0^\circ$ であるから、 $\alpha < 88.9^\circ$ のスキッド端面角度の場合、トルク力で持ち上がる事が可能となる。

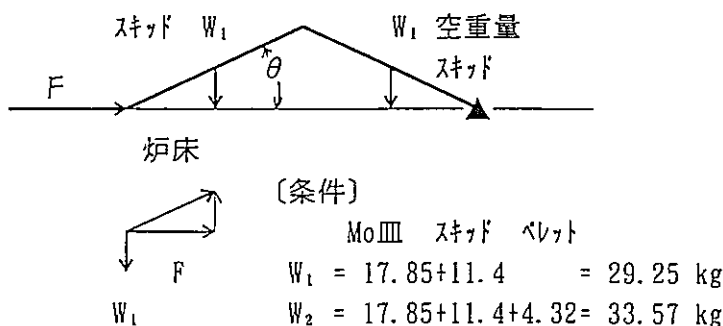


図2 スキッドの持ち上げ角度

$$\theta = 90 - \alpha$$

$$\theta > 1.1^\circ$$

従って、スキッドが持ち上がるキッカケは、スキッドの端面の直角度が悪い場合の可能性も捨てることは出来ない。

2) スキッドの2枚以上の複合でジャミングが発生する可能性について

これまでの解析評価対象は、原則的に2枚のスキッドによる相互作用で、スキッドが持ち上がる条件についての検討である。すなわち一方のスキッドが固定され、もう一方のスキッドがプッシャーにより押されてスキッドが持ち上がる場合であった。

空スキッド6枚の複合作用が、これまでの臨界角度 θ を小さくする可能性が有るか検討を行う。

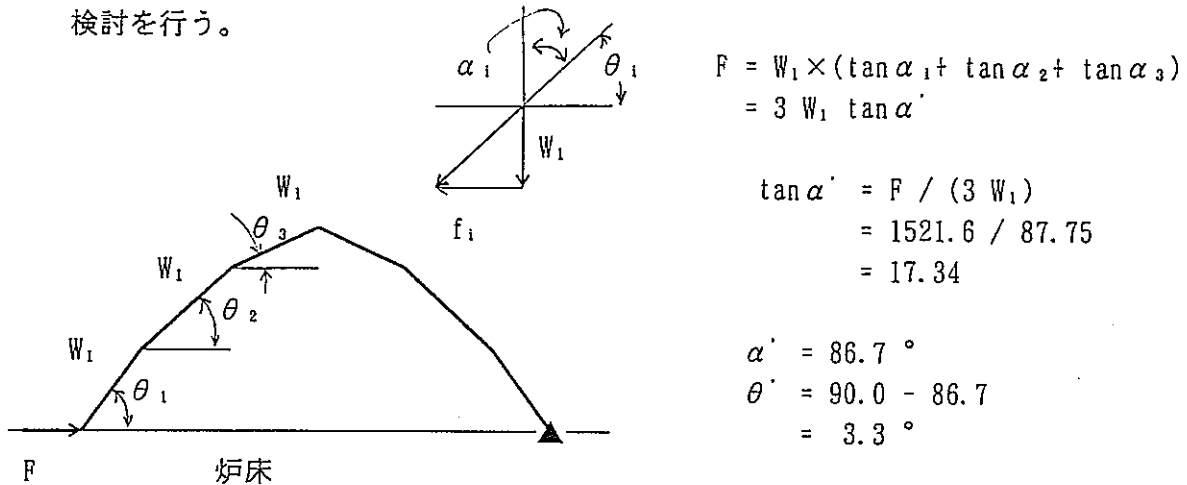


図3 6 スキッドの持ち上げ角度

平均角度は 3.3 ° 以上必要となる。
従って、まずスキッド2枚の相互作用でスキッドが持ち上がらなければ、図3

に示すようなブリッジは形成されない。各スキッドの重量が相対的に大きいために、簡単に複合作用は発生しないものと判断される。

3. 検討結果

ジャミングの発生のきっかけは、原則的に2枚のスキッドの相互作用で説明可能である。一方のスキッドがなんらかの原因で固定されるような過負荷が発生し、プッシャーで押されたスキッド端が臨界角度 $\theta > 1.1^\circ$ の傾きを発生する要因との複合作用の結果、トルク 500 Nm の応力でジャミングを発生したものと判断される。

スキッドがなんらかの原因で固定されるような現象は、連続焼結炉床の出口側のレンガが1個外れていることとの因果関係が想定される。

臨界角度 $\theta > 1.1^\circ$ の傾きを発生させる要因としては、前回の解析で指摘したように、もんじゅペレットの乗り上げによるものと、今回解析結果に基づくスキッド端部の直角度からのずれ、のいずれでも発生する可能性は否定できない。

以上

スキッド及びペレットが持ち上がる条件

平成 5年 6月21日
 プルトニウム燃料工場管理課

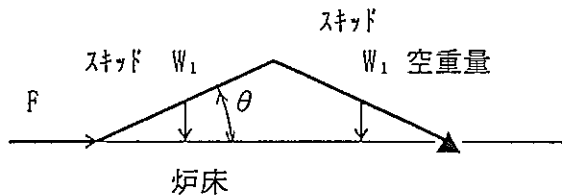
1. 目的

500 Nmのトルクリミッター設定値で操作した場合に、連続焼結炉のスキッドが持ち上がり、ジャミングを発生させる条件の検討を行った。もんじゅペレットにおいて端面直角度が悪いペレットに所謂ウェービング現象が起きる事象が発生した。その発生条件の検討を合わせて行う。

2. 検討内容

1) スキッド端面の直角度が出ていない場合にスキッドが持ち上がる可能性について

図1に示すように、片側のスキッドが固定され、①押される側のスキッドの直角度が維持されていない場合、又は②スキッド端部がすでに θ 度持ち上がっていた場合（ペレットに乗り上がっている場合、炉床タイルが傾いている場合が考えられる。）、静力学的に2枚のスキッドが臨界角 θ からしばらくの間、力学的平衡状態で持ち上がることが容易に起こる。トルク力でスキッドに発生する水平力Fによりスキッドと炉床とのなす角度 θ のスキッドが持ち上がるのは、



$$\begin{aligned}
 W_1 &< F \cdot \tan \theta \\
 \tan \theta &> W_1 / F \\
 &= 29.25 / 1521.6 \\
 &= 0.01922 \\
 \therefore \theta &> 1.10^\circ
 \end{aligned}$$

(条件)
 MoⅢ スキッド ペレット
 $W_1 = 17.85 + 11.4 = 29.25 \text{ kg}$
 $W_2 = 17.85 + 11.4 + 4.32 = 33.57 \text{ kg}$

1.10°の角度があらかじめ無いとスキッドは持ち上がらない。

図1 スキッドの持ち上げ角度

端面直角度を問題とするならば、図1に示す応力の発生は、図2に示す形態の時に発生する。しかし、モリブデン製スキッドは、機械加工製品でありその平滑度も良好なことを考慮するならば、本原因の可能性は少ないと判断される。

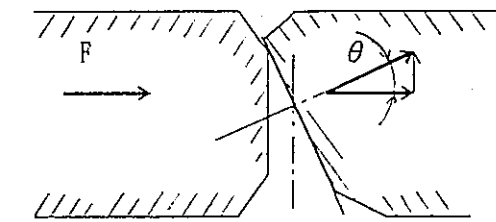


図2 スキッド端面部分

2) もんじゅペレットが浮き上がる条件

従来のウェービング試験では、トレイ上に並べた約30個のペレットの両端にピンセット等で応力を加え、ペレットが浮き上がることで、端面直角度の悪さを確認している。この場合のペレット浮き上がり条件を同様の手法で計算する。

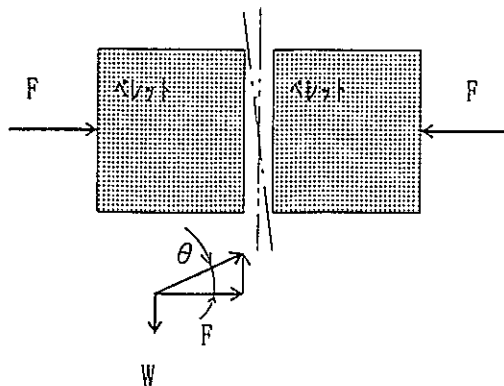


図3 ペレットの応力図

〔条件〕

- ・もんじゅペレット
重量 2 g
外径 5.4 mm
高さ 8 mm
- ・常陽ペレット
重量 1.5 g
外径 4.6 mm
高さ 8 mm
- ・応力 F 500 gf

もんじゅペレットの場合、

$$\begin{aligned}
 F \cdot \tan \theta_M &> W_M \\
 \tan \theta_M &> 2 / 500 \\
 &= 0.004 \\
 \therefore \theta_M &> 0.23^\circ
 \end{aligned}$$

常陽ペレットの場合、

$$\begin{aligned}
 F \cdot \tan \theta_J &> W_J \\
 \tan \theta_J &> 1.5 / 500 \\
 &= 0.003 \\
 \therefore \theta_J &> 0.17^\circ
 \end{aligned}$$

と何れの場合も浮き上がりに必要な臨界角度が小さい。セラミックであることからその角度は、端面直角度のバラツキ範囲内にあると判断される。計算に使用した応力は、人力であるから容易に大きくできる範囲であることから、ペレット列に両側から応力をかけた場合に、浮き上がりは容易に発生する。

従って、ペレット充填でも抵抗が大きくなるのに対し、単純に充填力を増加させると被覆管内面の半径方向（充填方向に対し垂直な応力）におおきな応力が発生し、クサビ効果で充填が不可能な事態になる。従って、振動等を加え、たえず充填方向にたいし、垂直方向の応力を解除しつつ充填することが必要である。

3. 検討結果

スキッドの場合は、自重に比較し、相対的に応力が低いため、スキッドの浮き上がりを起こしにくくしている。一方、ペレットの場合は自重が小さいため、小さな応力でも浮き上がりを起こしやすい。

スキッドの浮き上がりを防止するには、出口側のスキッドの固定化防止対策とともに入口側のプッシャーからの応力を可能なかぎり小さくすることが重要である。

22スキッドの全てにペレットが装荷されている場合に摩擦抵抗に打ち勝って移動させるのに必要な応力は、591 kgf である。現在のトルクリミッターで発生する最大応力 1521.6kgf に比較して大きすぎると思われる。

押し出し応力が小さい程スキッドの浮き上がりの可能性は小さくなる。今回の経験で、スキッドと炉床との焼きつけが発生しなかったこと、炉床の摩耗も少ないこと、炉内の22スキッド中に空スキッドが存在していること等から、実際の駆動応力も計算値に近い値か若干小さな値であると推定される。

従って、トルク値を現在の 500 Nm から 5 % ないし 10 % 低下させることは、可能であり、安全性の増加のために必要と判断される。心配ならば、実際のトルク値を測定した上で、計算値通りであることを確認した上で、設定値を落とすことが望ましい。

製造メーカー側が推奨したトルク値の変更に関して、その設定根拠が、焼付け防止のためであるならば、①スキッドが動いている場合に、焼きつきは発生しにくい、②長時間プッシャー停止の場合は、炉温度を降温させることにしているため、設定トルク値を低下させることによる製造課の懸念は発生しないと思われる。

焼結炉ヒーターの切断条件の確認

平成 5年 6月19日
プルトニウム燃料工場管理課

1. 目的

500 Nmのトルクリミッター設定値で作動した場合に、連続焼結炉内のNo2のヒーターが切断した条件を解析し確認する。

2. 検討内容

事象が発生した時期の焼結炉内の温度は約1650° C の環境下にあった。この環境下での切断条件の検討。

1) 500 Nmのトルクリミッター作動時における応力の発生

〔解析条件〕

- ・ Moヒーター 2.5 mm φ、15 本
- ・ 温度 約1700° C
- ・ 500 Nmのトルク発生 1521.6 kgf

〔解析〕

Mo棒 15 本を束ねた直径約12 mm φのヒーターにMo皿が当たり、剪断応力が発生して切断されるとした場合に発生する応力は、

$$\begin{aligned}
 \text{Moヒーターの断面積} & A = 2.5^2 \times \pi \times 15 / 4 \\
 & = 73.63 \text{ mm}^2 \\
 \text{発生荷重} & F = 1521.6 \text{ kgf} \\
 \text{Moヒーターに働く剪断応力} & \tau_1 = F / A \\
 & = 20.7 \text{ kgf/mm}^2
 \end{aligned}$$

となる。通常時の移動で発生する力は、22スキッド全てにペレットが装荷された場合で 591 kgfであるから、この場合の剪断力は、

$$\begin{aligned}
 \tau_2 & = F / A \\
 & = 8.0 \text{ kgf/mm}^2
 \end{aligned}$$

である。

2) Mo材料の引張強さ

これに対し、Mo材料の機械的強度の値は、約1300° C までは、便覧等にデータが表示されているものの、1700° C 近傍のデータは公表されていない。このデータを非公式に入手したメーカーの値は以下の通りである。

- ・ 常温での値 (機械工学便覧からの引用)
 - Moの引張強さ (焼なまし) 70~100 kgf/mm²
 - Moの伸び (焼なまし) 10~20 %

- ・ 1093° C での値（原子炉材料ハンドブックからの引用）
Moの引張強さ 26～ 30 kgf/mm²
- ・ 1316° C での値（原子炉材料ハンドブックからの引用）
Moの引張強さ 9.1 kgf/mm²
- ・ 1800° C（真空中）での値（メーカー値）
Moの引張強さ（耐熱性品） 3.6 ～ 4.7 kgf/mm²
Moの引張強さ（市販品） 1.2 kgf/mm²

3. 検討結果

約1700° C のMoヒーターは、高温での引張強さと比較して、破断するにたる応力を受けていたことになり、破断して当然である。

従って、高温のMoヒーターに接触するならば、ヒーターの切断現象は、トルクリミッターの設定範囲内で発生する。