

冷間圧延用作業ロールのスポーリングとその防止 Spalling and Its Prevention for Cold Mill Work Rolls

中川師夫* Nakagawa Mitsuo

冷間圧延用作業ロールの圧延成績は、スポーリング（表面のはく離）により左右されるため、ロールのメーカー及びユーザー共にスポーリングについての関心は高い。

ロールの諸特性及びスポーリングの現象と原因について調査し、スポーリングを防止するためのロールの管理法について述べた。

スポーリングの半数以上が表面に起点を持ち、表面のクラック及び熱影響部を完全に除くことにより、この種のスポーリングを防止できることを示唆した。

1 緒言

冷間圧延に使用される作業ロール（以下、単にロールという）は耐摩耗性に優れ、かつ塑性変形しにくいことが必要であるため、高い表面かたさと十分な硬化深度が要求される。これらの要求を満たすためにロールは特殊な小型のものを除き、一般に0.7~1.0% C, 1.0~5.0% Crを基本成分とし、これに少量の特殊元素を添加した材質を用い、強烈な水焼入れ及び200°C以下の低温焼もどしを行なって、表面をショアかたさ(Hs)90以上として使用される。したがって、ロールの表面層は非常に硬くてもろく、また、熱的に不安定であるという特徴をもっている。

近年、冷間圧延機は大型化、高速化及び高精度化が進み、これに使用されるロールの製造技術や性能も相当に向上している。しかし、圧延技術やロール性能の向上にもかかわらず、避けられないのが絞り込みやスリップなどの圧延事故と、それに伴ってロールに発生するスポーリングと呼ばれる表面層のはく離事故である。スポーリングが発生すると研削量が極度に増加し、最悪の場合には廃却径に達することもある。し

たがって、いかにしてスポーリングを防止するかはロール関係者にとって大きな関心事である。

スポーリングを防止するためにロールメーカーは、耐スポーリング性に優れたロールの開発が必要であり、また、ユーザーはロールの特性をよく認識し、その性能を十分に発揮させるような管理が必要である。近年、ロールメーカーとユーザーは、スポーリングを防止するために必要な情報交換を積極的に行ない、スポーリングの発生頻度はかなり減少の傾向を示しているが、スポーリングの原因についてはまだ不明の点も多い。

筆者は先に、「四重圧延機用補強ロールに発生するスポーリングを防止するためのロールの管理法」について種々検討した¹⁾。しかし、作業ロールに発生するスポーリングについては、その発生機構が異なる場合が多いので、スポーリングの防止対策も異なってくる。

本稿は、作業ロールに発生するスポーリングの防止を目的として、ロールの特性、スポーリングの現象と原因及びロールの適切な管理法について述べる。

2 ロールの諸性質

スポーリングに影響を及ぼすロールの諸性質としては、熱衝撃強度、引張り強度及び転動疲労強度が挙げられ、ここではかたさと強度に的を絞って述べる。ただし、かたさはいずれも試験片に対するものであり、実体ロールに換算するにはHsで約10加算して考えなければならない²⁾。

(1) 熱衝撃強度

圧延中にロールが絞り込みやスリップなどの事故に遭遇した際に熱衝撃を受けると、ロール表面はその程度に応じて損傷する。熱衝撃強度はロールにとって最も重要な特性の一つであり、種々の試験法が開発されている^{4)~6)}。

日立製作所は、回転円板（ロール材）にスライダ（軟鋼）を押し付け摩擦熱による熱衝撃試験法によりロール材の選定及び適切な熱処理法の確立を図っている⁷⁾。

図1に0.85% C-2.15% Cr鋼について、かたさと熱衝撃強度の関係を示す。これよりかたさを下げることにより熱衝撃クラックは減少することが分かる。したがって、圧延事故の多いミルでは、ロールのかたさを低くすることが有効であると思われる。

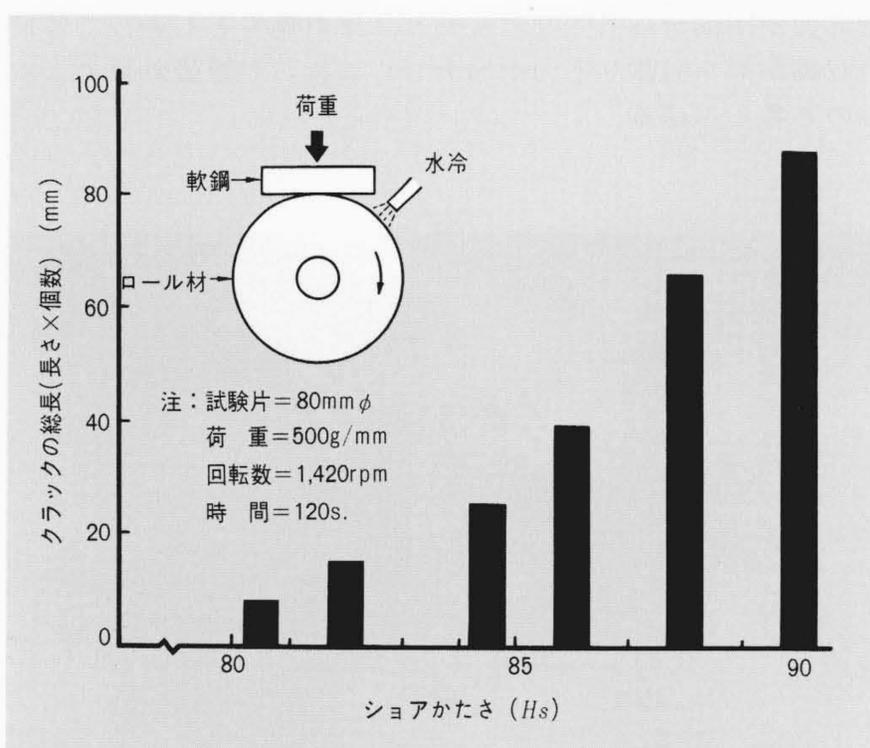


図1 ロールのかたさと熱衝撃強度の関係 ロールのかたさを下げることにより、熱衝撃を受けた場合のクラックは減少する。

* 日立製作所勝田工場

(2) 引張り強度

図2にかたさと引張り強度の関係を示す。すなわち、平滑材の引張り強度はHs65まではかたさに比例して増すが、それよりも高いかたさでは下まわるものが現われ、逆にかたさの上昇につれて減少するものもある。また、荷重方向に直角なクラックを持つ場合の引張り強度はHs約55までは平滑材よりも強いが、これを頂点として急激に低下する。

これよりロール表面のように、かたさの高い領域では平滑材であっても非金属介在物などの微小欠陥により強度に差が生じ、クラックが存在すると強度は極端に低下することが分かる。したがって、クラックを残したままロールを使用することは絶対に避けなければならない。

(3) 転動疲労強度

ロールは材料及び補強ロールと接触しながら転動するので、

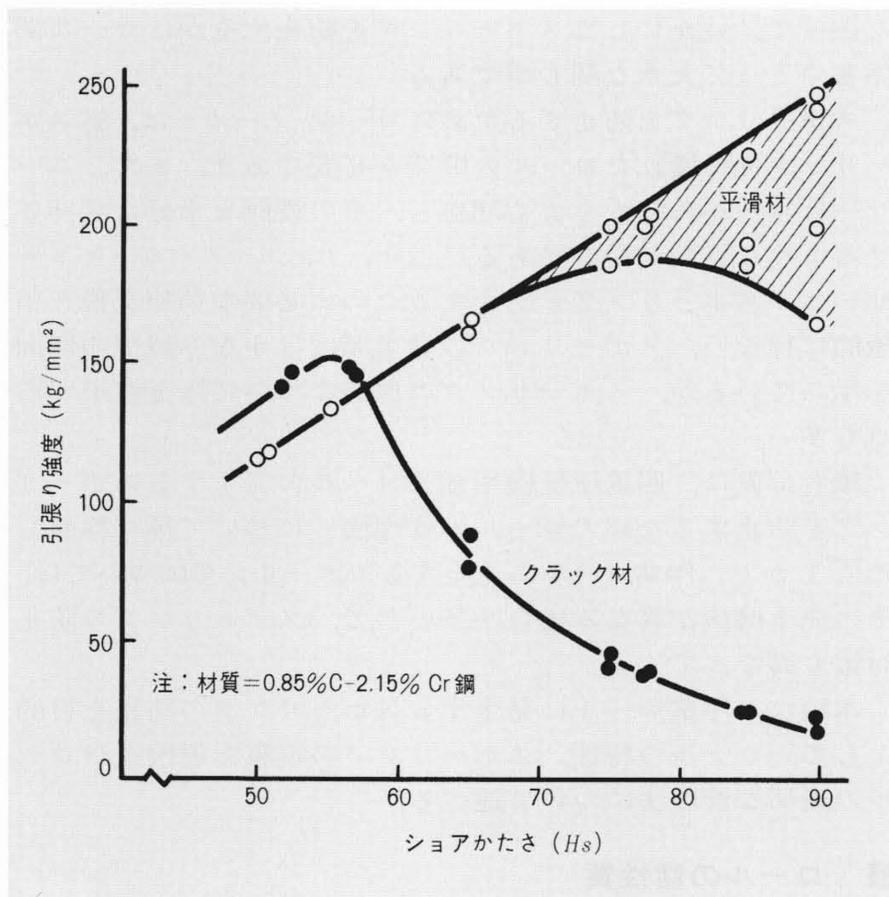


図2 ロールのかたさと引張り強度の関係 引張り強度は、かたさの高い領域で平滑材のばらつきは増し、クラック材では非常に低下する。

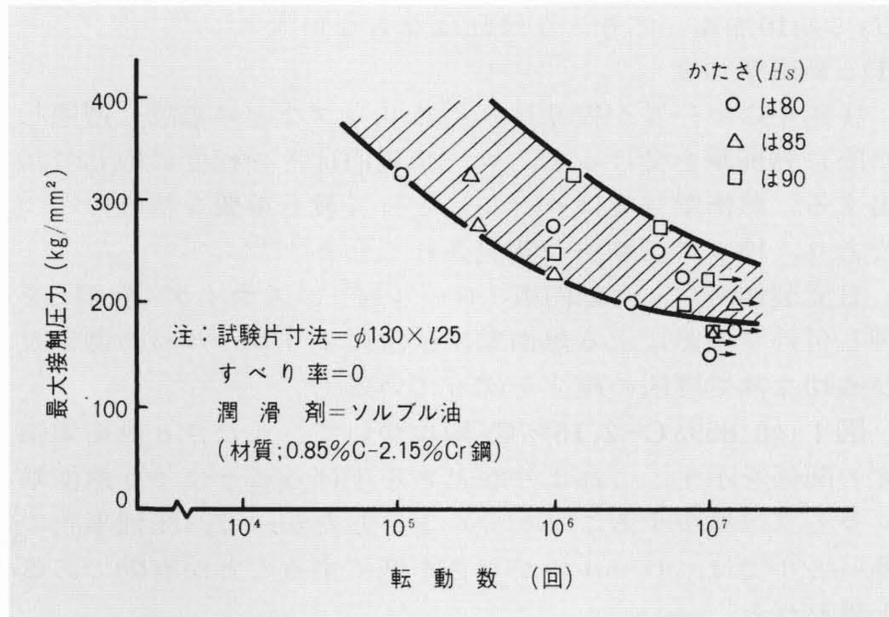


図3 スポーリング発生までの最大接触圧力と転動数の関係 すべりが伴わない場合の転動疲労強度は最大接触圧力で180kg/mm²であり、かたさがNs80~90では差がない。

接触圧力が疲労限度以上であればスポーリングを発生する。

図3は転動試験結果の一例で、試験片のかたさはHs80~90に調整した。縦軸に最大接触圧力、横軸にスポーリング発生までの転動数を示す。これより、最大接触圧力が180kg/mm²以下では転動数が10⁷回以上でもスポーリングは発生せず、またHs80~90の範囲で実験値にかなりのばらつきを持ち、かたさについての傾向は認められないことが分かる。

小型ミルでは最大接触圧力が200kg/mm²を超えるものもあるが、一般のミルではロールと補強ロール間では120~150kg/mm²であり、ロールと材料間ではこれよりも低い。したがって、純粋な転動疲れによるスポーリングは少ないものと考えられる。

3 スポーリングの現象とその原因

ロールに作用する応力及びスポーリングの発生因子については、数多くの文献で紹介されている^{8)~13)}ので省略し、スポーリングの事例をもとにその原因を探ってみることにする。

(1) 絞り込み事故によるスポーリング

絞り込み事故とは、圧延中に材料の不良や操作ミスにより材料がロールに幾重にも巻き付き、局部的に強圧下されロール表面に焼き付く事故をいい、この際にロールの表面層は熱衝撃を受ける。ロール損傷の度合は事故の大小によって異なり、軽度の場合は局部的に表面が焼もどされる程度であるが、その程度がひどくなるにつれて焼もどし層は深くなり、クラックを伴ってくる。更に、重度の場合は大きなスポーリングを発生する。

図4は中程度の絞り込み事故に遭った場合を示すもので、溶着した材料を取り去り、軽く研削し、腐食後のロール表面を示しており、クラック及びスポーリングが観察される。

図5にはく離片の断面かたさ分布及び組織の調査結果を示す。すなわち、スポーリングを生ずるような熱衝撃を受けた場合には、ロールのごく表面に再焼入れ層、その直下に高温焼もどし層が存在する。また、熱衝撃温度については熱衝撃試験結果から推定される。

絞り込みによるクラックやスポーリングの発生機構としては、ロールの表面層が熱衝撃により圧縮塑性変形を受け、残留応力が圧縮から引張りに変わり、また焼もどし過程で体積の収縮があり引張り応力が増大し、これらの重畳効果によるものと考えられる。

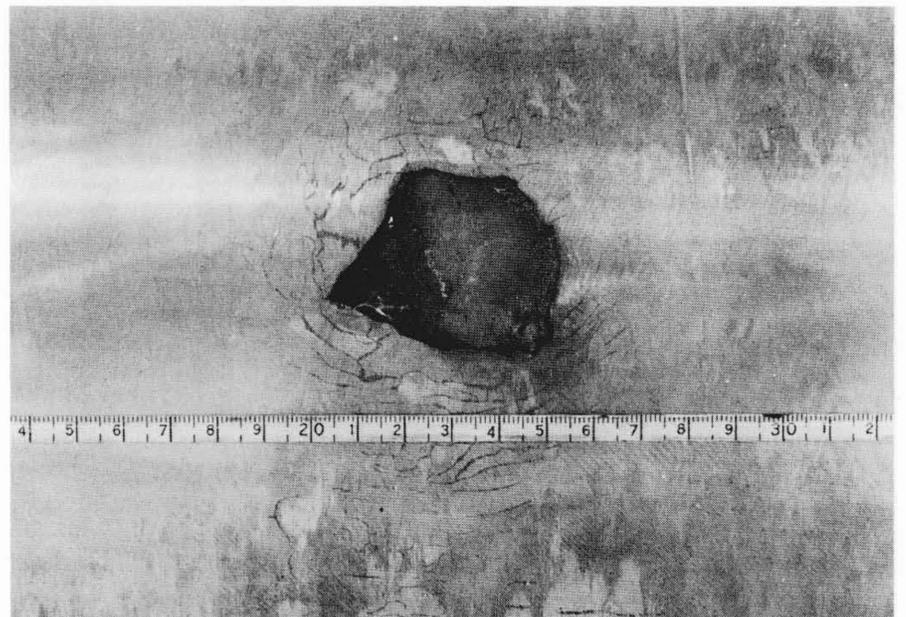
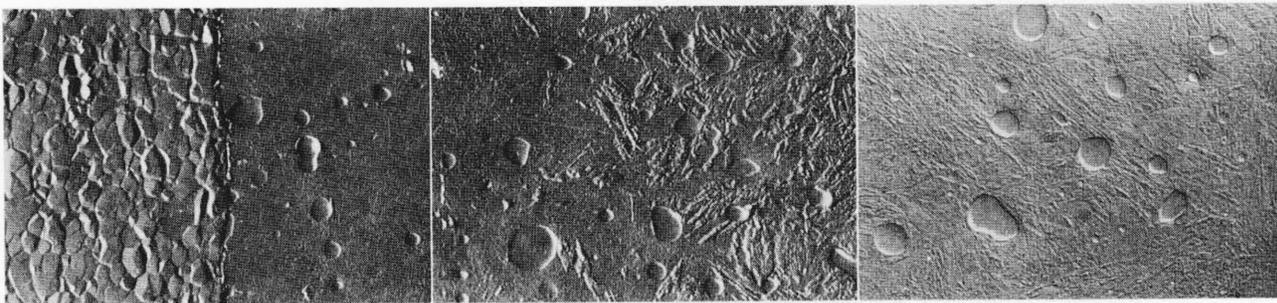


図4 絞り込み事故により発生したクラック及びスポーリング ロール損傷の度合は事故の程度により異なり、大きな事故ではクラック及びスポーリングの大きさ、深さは増す。



(a)被圧延材と高温焼入れ部 (b)不完全焼入れ部と高温焼もどし部 (c)低温焼もどし部

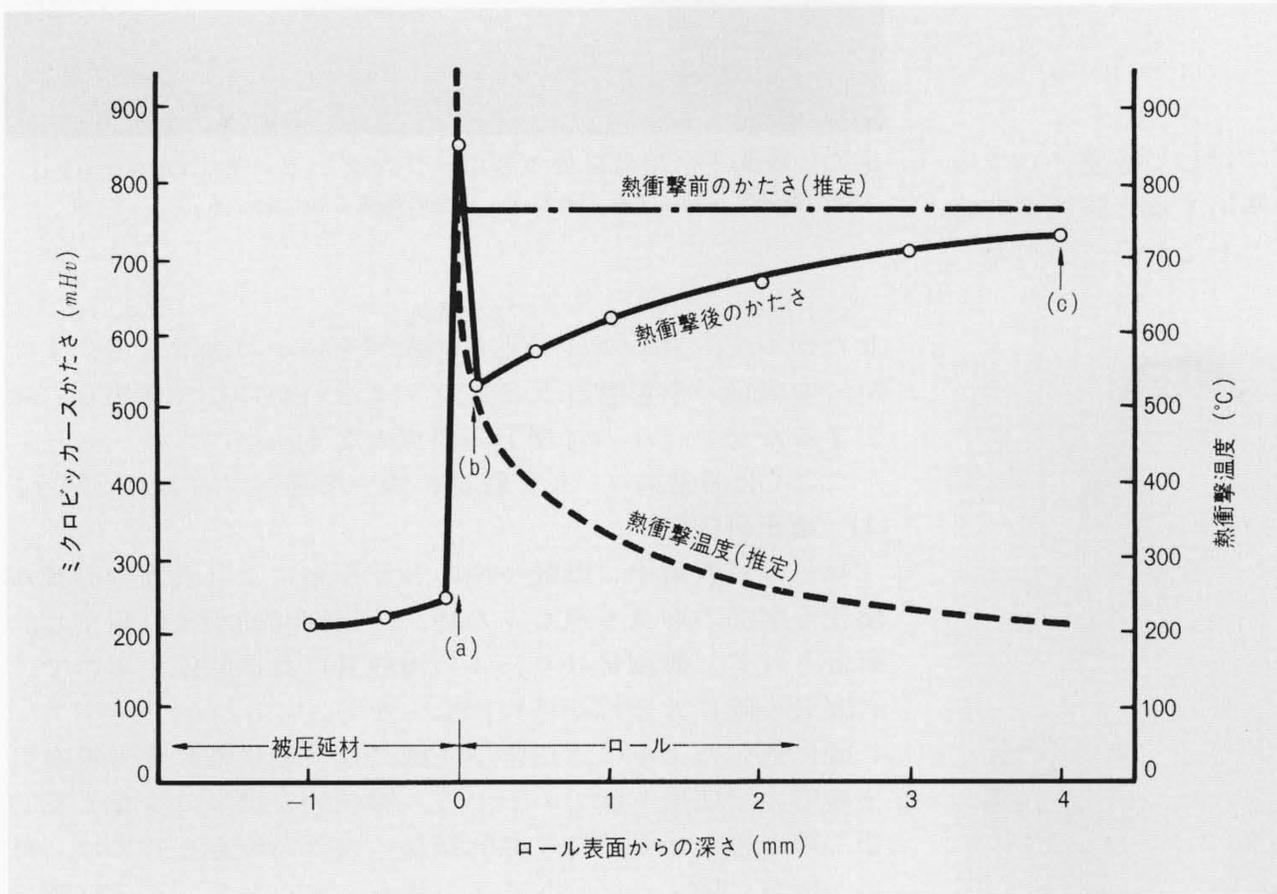


図5 スポーリングの破片の調査結果 ロール表面に再焼入れ部、その直下に高温焼もどし部が存在する。かたさ分布の測定により熱衝撃温度の推定が可能である。

(2) 表面に起点のあるスポーリング

ロールの性質及び使用状況から、クラックの成因は数多くあり、クラックを残したまま使用されることも多く、スポーリングの半数以上は明らかに表面に起点を持つものである。

図6は板耳の当たる部分に発生したクラックを起点としたスポーリングの例で、破片の裏面を示す。この種のスポーリングは、表面クラックが接触点の進行方向に向かって接線方向に鋭角的に内部に進み、残留応力や組織の影響により、ある深さに達するとその進行方向を接線方向に変え、一定深さのところを進展し、不安定破壊条件が満たされるとはく離するものである。

スポーリングの発生因子として法線力だけが作用する場合は、表面下の最大せん断応力が有力であろうが、すべりにより摩擦力を伴う場合には表面に生ずる摩擦力が重要な因子となる¹⁴⁾。また潤滑油により生ずる裂開力や流体衝撃力も見逃せない要因であろう。図6にも明らかに表面から浸入した潤滑油が起点近傍の疲れ破面部に認められる。

図7にロールの胴端近傍に発生したスポーリングの例を示す。起点は同図(b)に示すように、胴端一線上に出たクラックの一部(○印)であり、これが内部に進展し、スポーリングに至っている。

本スポーリングは、前述のものと発生機構が異なると考えられ、接触圧力やかたさ分布につき調査した。図8はロールの胴端近傍のかたさ分布を示すもので、使用後は胴端で最高かたさとなり、直径で0.14mm研削した後でもこの傾向は変わらず、極度に加工硬化している。これはロールのたわみにより、使用中にロール同士が胴端近傍で強い圧力で接している

ために、疲労によるクラックが発生、進展し、スポーリングに至ったものと考えられる。

(3) 表面下に起点のあるスポーリング

一般の高速ミルでは、ロールに材料欠陥がない場合には表面下に起点をもつスポーリングは非常にまれであるが、小型の低速ミルではこの種のスポーリングが観察される。起点には非金属介在物や欠陥が存在するのが普通であるが、その位置は理論的に生ずる最大せん断応力の位置よりもかなり深い所にあり、硬化層や残留応力及び熱応力の分布が影響すると考えられる。

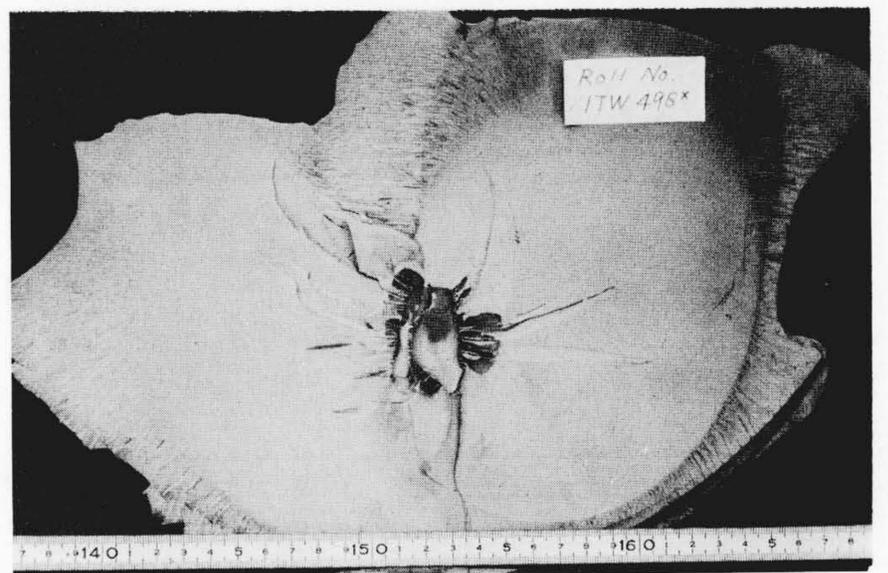


図6 表面に起点を持つスポーリング 破面の特徴として帯状の疲労破面がみられ、潤滑剤が浸入し変色することもある。

図9は直径155mmのロールに発生したスポーリングの例で、同図(a)は起点に非金属介在物が存在するが、同図(b)にはマクロ的欠陥は認められない。しかし、起点の位置は表面下25mmで同一深さにある。この位置はかたさが最も低く、残留応力は引張り応力の最大値に近く、また使用中に引張りの熱応力が作用し、強度上の弱点となっていたと推定される。

スポーリングの防止対策として、かたさ及び残留応力分布を改善する熱処理法を採用し、また潤滑油の増量とロール予熱による熱応力の低減を図った。

4 ロールの管理

これまでにロールの特性として、熱に対して敏感でクラックが出やすく、クラックを残したまま使用すると強度が非常に低下し、スポーリングの原因となることについて述べた。

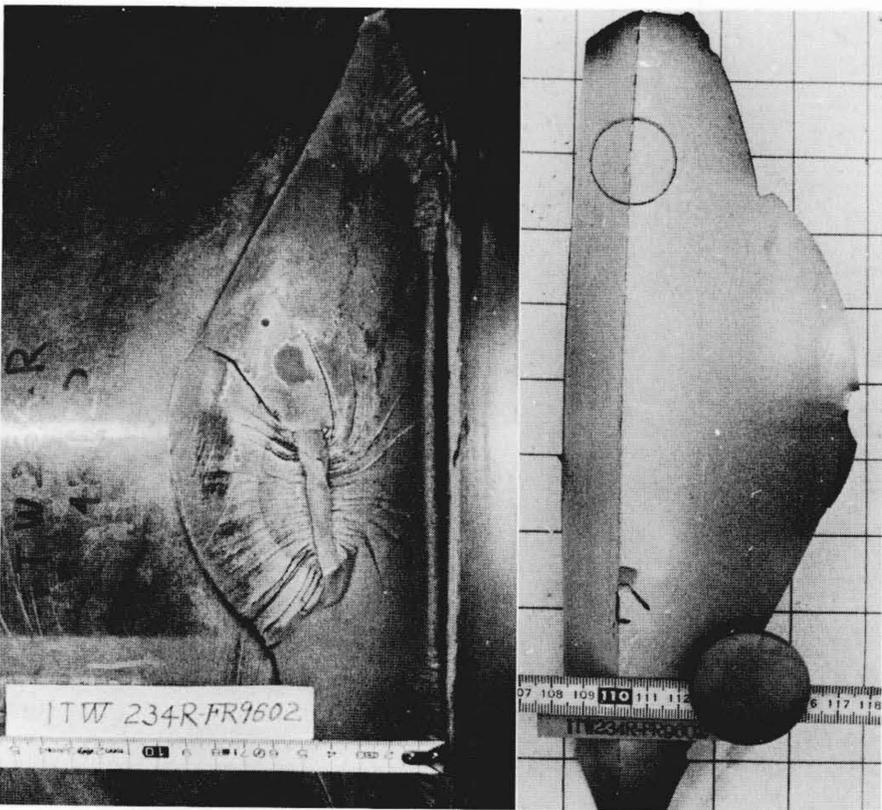


図7 胴端近傍に発生したスポーリング 胴端全周にクラックが認められ、その一部からクラックが内部に進展し、スポーリングに至った。

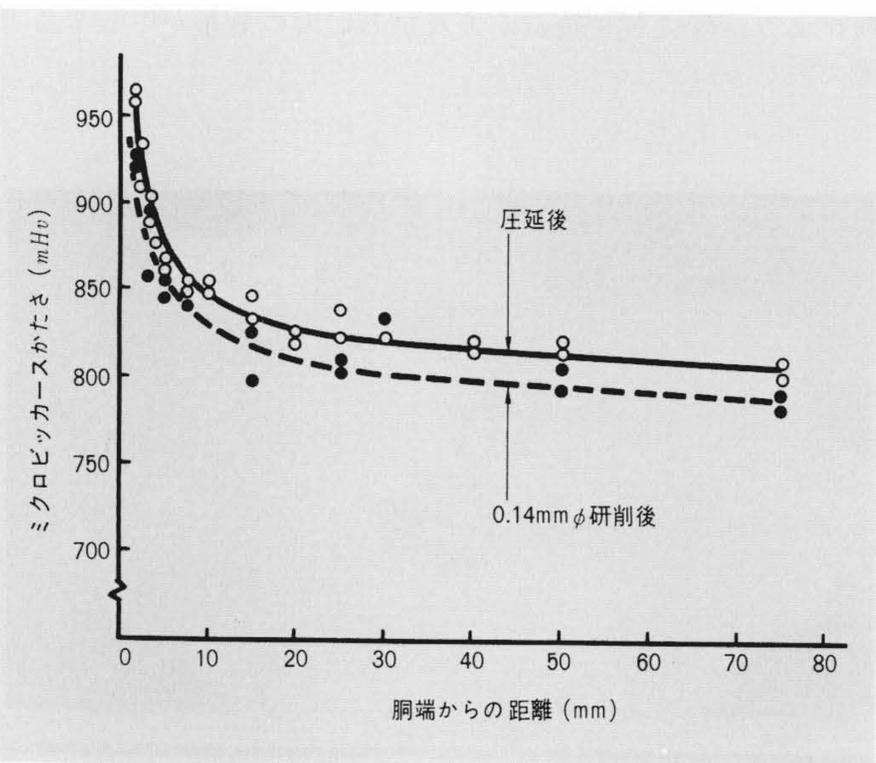


図8 胴端近傍からスポーリングしたロールのかたさ分布 胴端で極度の加工硬化が認められ、直径0.14mm研削後でもその傾向は変わらない。

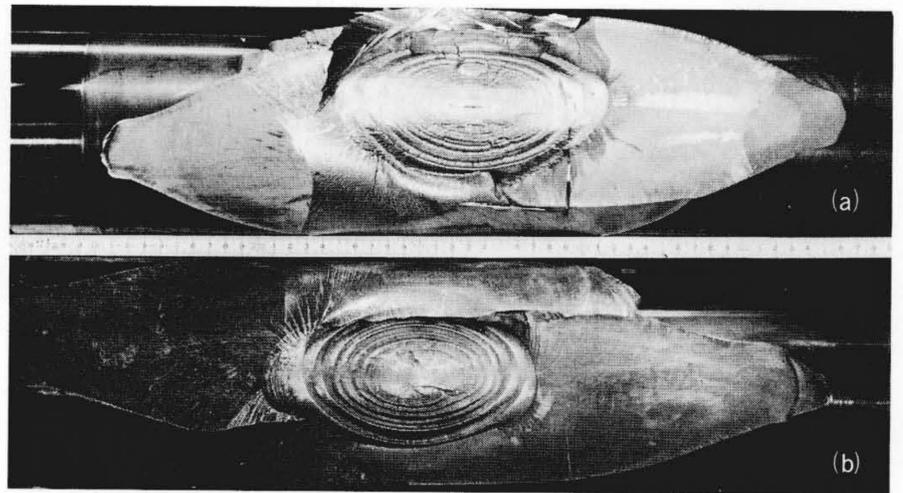


図9 表面下に起点を持つスポーリング この種のスポーリングは、大型の高速ミルではまれであるが、小型の低速ミルに起こる。

したがって、ロールに与える熱衝撃をいかに少なくし、またロール表面の熱影響部及びクラックをいかにして検出し、除去するかがロールの管理上の要点となる。

ここでは日常のロールの管理について述べてみたいと思う。

(1) 適正研削量

ロールは使用中に摩耗や凹みきずなどにより表面の形状が悪化し製品の形状を損なうため、一定期間使用後に組下し、研削される。研削量はロールの消耗量に直接関係するので、必要最小限にとどめなければならない。

既に述べたように、正常な圧延では一般に転動疲労限度以下の応力で使用されているので、機械的な損傷は少なく熱的なものと思われる。特に熱的損傷の大きい位置としては、材料が板耳に接する部分が考えられる。すなわち、この位置では著しい応力集中¹⁵⁾と材料の形状不良とに基づく面圧のばらつきや、すべりが生じている。したがって、この位置を基準として研削量の管理を行なえばよいであろう。

図10に板耳の接するロール表面層の熱影響度を腐食法により調べた一例を示す。縦軸は同図に示すように腐食された部分の黒化度を熱影響度とし、横軸は研削量を示す。上ロールでは直径で0.15mm、下ロールでは直径で0.20mmの研削で熱影響層が除去されている。また、種々のミルについて同様の調査を行なった結果、熱影響層は直径で0.05~0.25mmの範囲にあることが分かった。適正研削量としては、熱影響層を完全に除去できる最少のものと考えられ、その量についてはそれぞれのミルについて調査し決めるべきである。また、X線によるロール損傷度の検出結果によると、疲労層が直径で0.2mmという報告¹⁶⁾もあり、本結果とほぼ一致している。

(2) 研削焼け

ロール表面層は、熱感受性の高いマルテンサイト組織であり、重研削や研削ミスにより研削焼けやクラックを生じ、ひどい場合はスポーリングが起こることもある。

図11は研削により発生したクラック及びスポーリングの例である。同図(a)は重研削されたもので、腐食により幅が約1mmの正常な白い部分と研削焼けした黒い部分とが認められ、研削焼けした部分にはクラックが出ている。同図(b)は研削ミスによるもので、最初の切込量が大きかったために生じた研削焼け及びスポーリングの例である。スポーリングの深さは約1mmで、その周辺にはクラックが認められる。研削焼けやクラックを残したままロールを使用すると、そこを起点としてスポーリングが発生するので、研削焼けの防止が必要でありその対策としては、適正研削条件の選択及び冷却法の改善が必要となる。

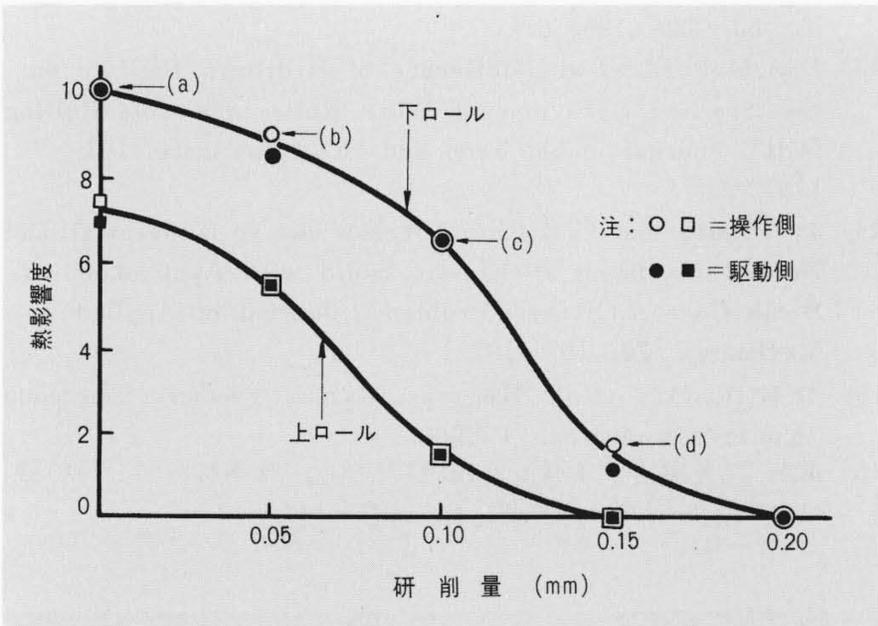
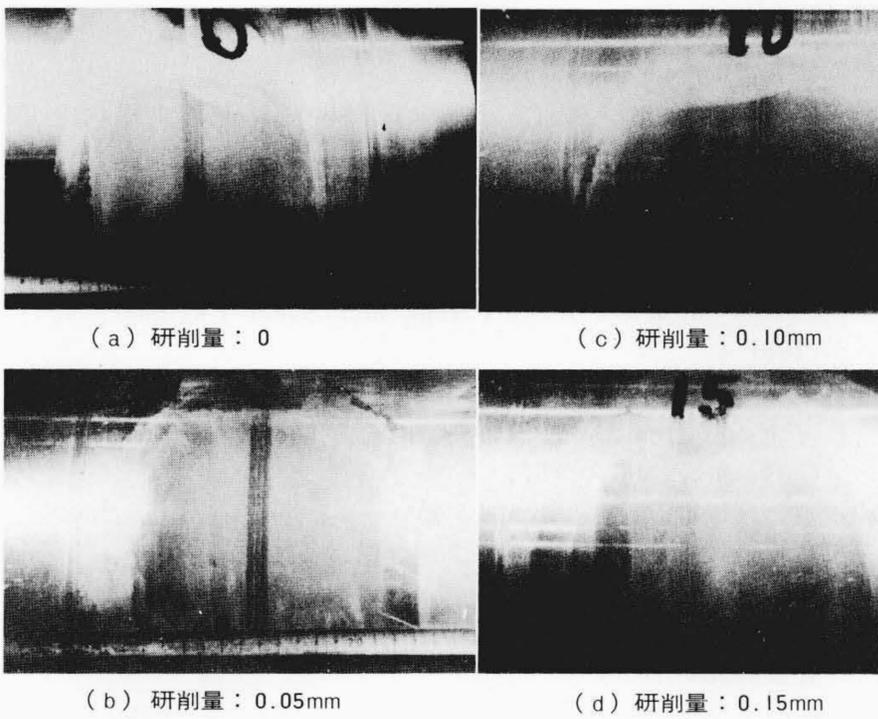


図10 ロール表面層の熱影響度 材料の板耳が接する位置でロールは熱影響を受けやすいので、この部分を基準として研削量の管理基準を決めればよい。

(3) スキッピング

絞り込み事故などによりロール損傷のひどい場合は、注意深く熱影響部やクラックが除去されるが、スキッピングなどによるクラックは見逃されやすく、これを起点としたスポーリングの発生率も高い。

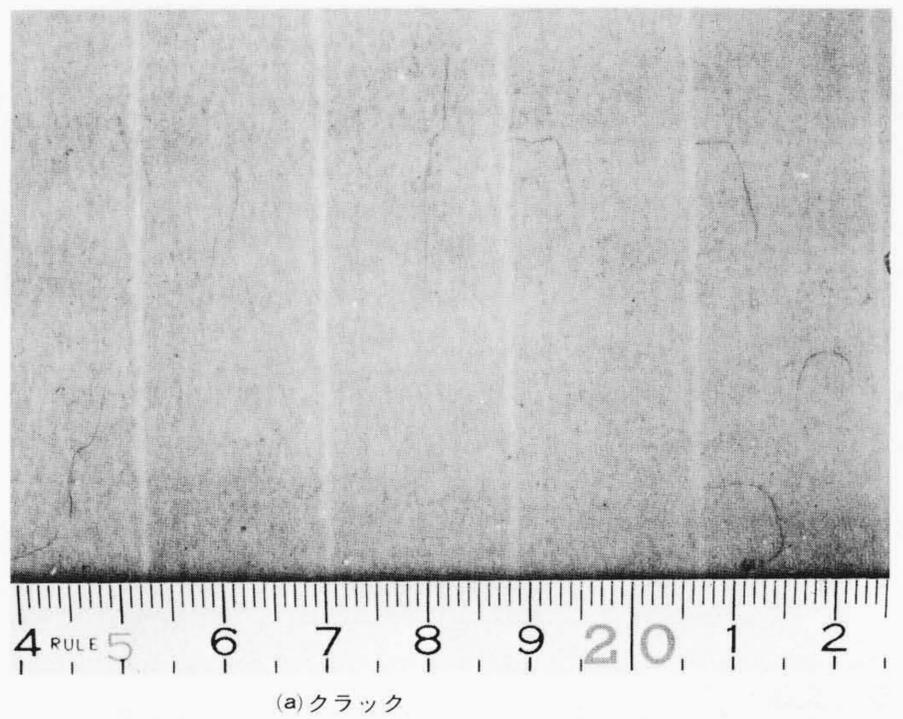
スキッピング クラックは、ロールと材料間の潤滑が不十分な場合に金属接触が生じ、その間でスリップが起こると摩擦熱により温度が上昇し、ロール表面の温度が製造時の焼もどし温度以上に達するために生ずると考えられる。

図12にスキッピング クラックの一例を示す。正常部のかたさがHs95~96であるのに対して、黒く腐食された部分はHs80~90と明らかに焼もどされている。スキッピング クラックを防止するには、その主因であるスキッピングの起こらない圧延条件を選ぶことが必要であるが、ロールのかたさを下げることが効果がある。またスキッピングを生じた場合には、クラックを熱影響部とともに完全に除去しなければならない。

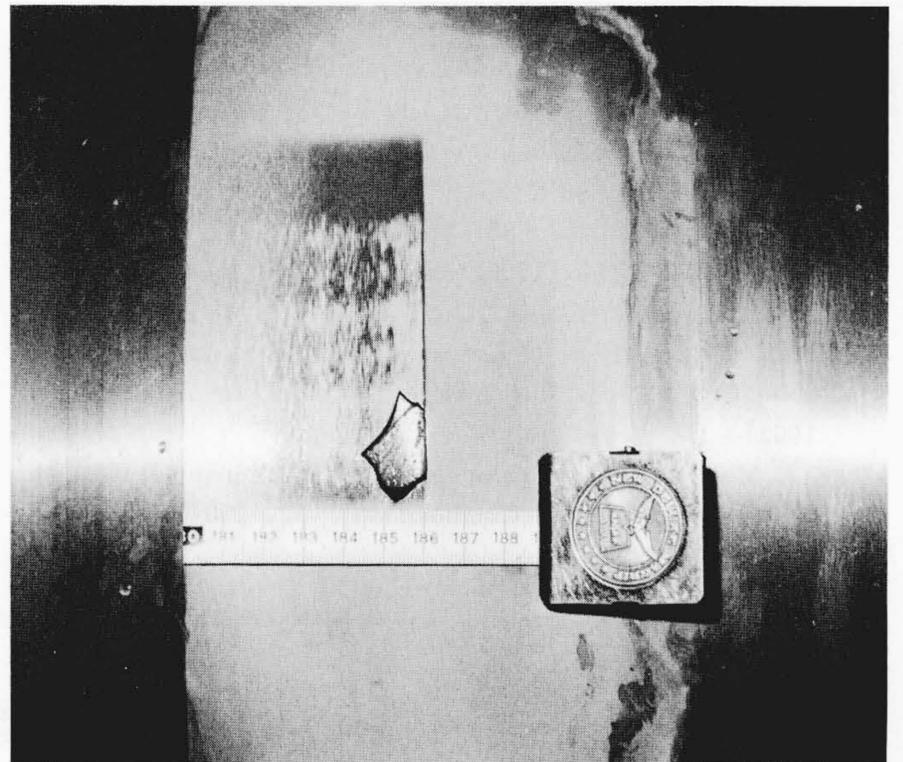
5 結 言

冷間圧延用作業ロールの圧延成績に、最も大きな影響を及ぼすのはスポーリングである。

スポーリングを防止するためには、その原因を明らかにす



(a)クラック



(b)スポーリング

図11 研削ミスによって発生したクラック及びスポーリング ロールは熱に敏感であり、研削ミスにより研削焼けやクラックが発生し、ひどい場合はスポーリングに至る。

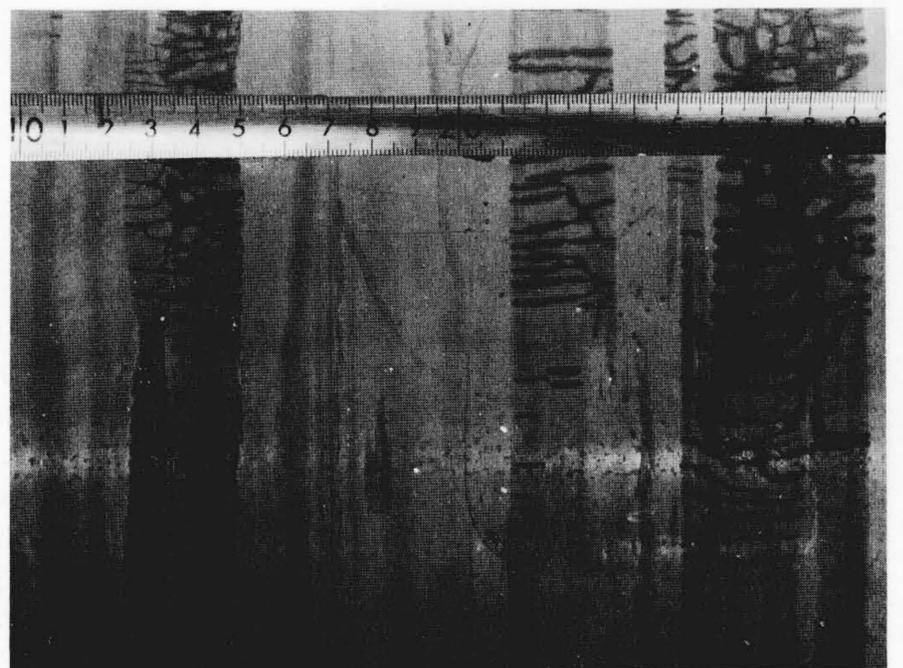


図12 スキッピングによって生じた熱影響部とクラック スキッピング クラックは、材料とロール間で潤滑油が切れた状態でスリップした場合にすべり方向と直角に生ずる。

るとともに、適切な対策が必要であると思われるので、ロールの特性並びにスポーリングの現象及び原因を調査し、スポーリングを防止するためのロールの管理法について述べた。

その結果、ロールは熱的に不安定でクラックが出やすく、クラックが出ると強度が極端に低下し、スポーリングに至ることを明らかにした。また、スポーリングの半数以上が表面に起点を持つものであり、適切なロールの管理によりこの種のスポーリングを防止できることを示唆した。

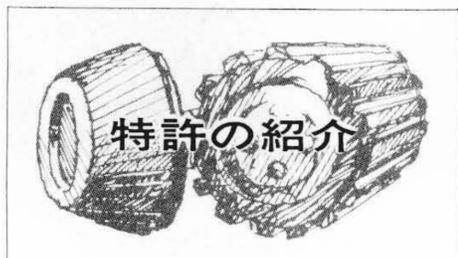
本稿が冷間圧延用作業ロールのスポーリングを防止するうえで幾らかでも参考になれば望外の喜びである。

終わりに、平素よりロールの使用、及び調査に深い御理解をいただいている製鉄所の関係各位に対し、深い謝意を表わすとともに、今後いっそうの御指導をお願いする次第である。

参考文献

- 1) 中川：「4重圧延機用補強ロールの適正研摩量の決定に関する一考察」、日立評論, 50, 562 (昭43-6)
ロール表面層の疲労損傷度が1以下に保たれるように理論的に適正研摩量の決定法について考察したものである。
- 2) 中川：「冷間圧延機用作業ロールの諸性質に及ぼす残留応力の影響」、日立評論, 57, 887 (昭50-10)
ロール表面には100~150kg/mm²の圧縮残留応力が存在する。また、8.6kg/mm²の圧縮応力によりショアかたさは1度上昇する。
- 3) 渡辺, 柴崎, 熊田：「焼入ロールの表面キズおよび焼入ロール用鋼の熱衝撃抵抗に関する研究」、日本製鋼技報, 9, 965 (1962)
- 4) G. E. Melley, "The Development of an Improved Forged Hardened-Steel Roll Composition", 52, 250 (1964-3)

- 5) 佐藤, 竹内, 三浦, 坂下：「冷延用ワークロール材の熱衝撃特性」, 10, 405 (1969-6)
- 6) 標, 広瀬：「コールドストリップ用ロールの材質と寿命」, 鉄と鋼, 57, 5, 785 (1971-4)
- 7) 星, 八重樫, 清野：「最近の冷間圧延機用ロール」, 日立評論, 56, 996 (昭49-10)
- 8) C. F. Zorowski, "An Analysis of the Stresses and Deformation in Work Rolls", Iron and Steel Engineer, 99 (1961-4)
- 9) M. Nakagawa, "Fatigue Failures of Hollow Work Rolls in Four-High Cold Strip Mills", Thesis at Syracuse University, July (1971)
- 10) 渡辺, 板本, 橋：「圧延機作動ロールの応力の二次元的解析」, 日本機械学会論文集, 38, 305, 48 (1972-1)
- 11) N. A. Kuklo : "The mechanism by which flakes form on the surfaces of rolls used for cold rolling", Stal, 6, 471 (1964-6)
- 12) 赤堀：「圧延用ロールのスポーリングについて」, 塑性と加工, 6, 53, 329 (1965-6)
- 13) D. A. Melford, et al : "Influence of Hydrogen Pick-up on the Spalling Behaviour of Work Rolls in a Cold-Rolling Mill", Journal of the Iron and Steel Institute, 163, (1972-3)
- 14) J. O. Smith and C. K. Lin : "Stress due to Tangential and Normal Loads on an Elastic Solid with Application to Some Contact Stress Problem", Journal of Applied Mechanics, 20, 157 (1953)
- 15) П. И. Полухин et al : "Известия Высших Учебных Завелений", Черная Metallургия, 71 (1960)
- 16) 武智：「X線によるロール損傷の検出」, 日本材料学会材料強度に関する討論会前刷集, 61 (1973-11)



ベント型燃料要素

広瀬保男

特許 第799112号 (特公昭49-34875号)

高速炉用の燃料要素は、高い燃焼度が要求される。燃焼度が高くなるに従って、核燃料の核分裂により発生する核分裂生成ガスの量が増大する。ベント型燃料要素は、核分裂生成ガスを外部に放出することにより、内圧の上昇を防止した燃料要素である。ベント型燃料要素の機能として、外部への核分裂生成ガスの円滑な放出と、内部への冷却材流入の防止が要求される。

図1は、本発明のベント型燃料要素の具体例で、その上部を示している。多数の燃料ペレットが、被覆管①の内部空間⑥内に配置され、ホルダ⑧が被覆管①内に設けられる。多孔質物質(例えば、焼結ステンレスブロック)④を、ホルダ⑧内にはめ込む。多孔質物質④及びホルダ⑧上方の空間③内に、液状物質(例えば、鉛44.5%、ビスマス55.5%の合金)⑤が充填される。開気孔細管⑦が、空間③の上方に設けられ、その周囲には環状空間⑩が存在する。

ベント型燃料要素は、冷却材として液体

ナトリウムを用いる高速炉の炉心部に配置される。高速炉の運転中、核分裂生成ガスは、内部空間⑥から多孔質物質④、液状物質⑤、開気孔細管⑦及び環状空間⑩を通り、放出口⑨より流出する。高速炉の停止中、開気孔細管⑦によって液体ナトリウムの流入が阻止される。多孔質物質④は、液状物質⑤の内部空間⑥内への流入を阻止している。

本発明によれば、表面張力の大きい液状物質を選択できるので、液状物質を通過させないための多孔質物質の孔部の直径を大きくできる。したがって、核分裂生成ガスの通過による多孔質物質の目詰まりを防止できる。前述した鉛-ビスマス合金の融点は、約120℃であるので、本発明のベント型燃料要素を冷却材外に取り出すと、鉛-ビスマス合金は固化する。これにより、多孔質物質の孔部は完全に密封される。放射性物質がベント型燃料要素外に漏れることはなく、高速炉外でのベント型燃料要素の輸送が、安全に行なえる。

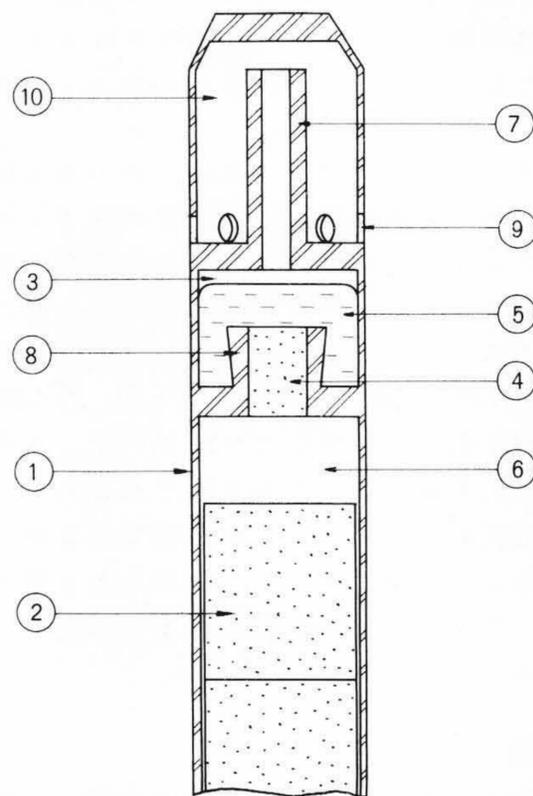


図1 ベント型燃料要素の具体例