

JAERI-M
93-060

核融合炉ブランケット照射試験体への
ペブル充填特性

1993年3月

中道 勝・河村 弘・佐川 尚司
石田 敏勝*・平田 慎吾*・鈴木 達志*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-41 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tckai-mura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

核融合炉ブランケット照射試験体へのペブル充填特性

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

中道 勝・河村 弘・佐川 尚司

石田 敏勝*・平田 慎吾*・鈴木 達志*

(1993年2月24日受理)

増殖材領域温度の制御特性を評価する上では、トリチウム増殖材ペブル及び中性子増倍材ペブルの充填率と熱伝導率の関係についての評価が重要である。充填率は、水流等による機械的振動や熱サイクルによる充填容器の熱膨張率差等による振動に影響を受ける。

本報告書は、これらの振動を模擬し、充填率壁効果、充填率分布、充填率経時変化、熱サイクルによる充填率変化について調べた結果をまとめたものである。主な実験結果を以下に示す。

- ①容器内径に対するペブル直徑の比が10以上で、約63%の充填率を確保できる。
- ②充填率が約60%の充填層に対して、中央部と壁近傍部のペブル充填状態は、ともにミクロ的に規則構造ではなく、密充填部と疎充填部が存在する。
- ③直徑が5mmと1mmのAl₂O₃製ペブルを拘束下で混合充填することによって、充填率は約77%となる。
- ④熱サイクル下においてペブルの疎充填時と密充填時では、容器壁荷重が約20kgから約200kgと1桁程度上昇する。

Characteristics of Pebble Packing into In-pile Mockup on Fusion Blanket

Masaru NAKAMICHI, Hiroshi KAWAMURA, Hisashi SAGAWA
Toshikatsu ISHIDA*, Shingo HIRATA* and Tatsushi SUZUKI*

Department of JMTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received February 24, 1993)

To control of temperature in breeder region of fusion blanket, it is necessary the data of thermal conductivity depend on the packing fraction of tritium breeder pebbles and neutron multiplier pebbles which are packed in the region. The packing fraction is influenced by the vibration. Vibration occurs coolant flow and thermal expansion under thermal cycle.

Four kinds of packing characteristics under vibration were studied. First is the effect of ratio of container inside diameter to pebble diameter on packing fraction. Second is the packing distribution. Third is the vibration packing characteristics. Last is the packing characteristics under thermal cycle.

From our study, it was shown as follows.

- ① The packing fraction is kept at constant value, i.e. about 63% under the condition that the ratio of container diameter to pebble diameter is above 10.
- ② The packing construction of center and nearby wall are no systematic arrangement and have close packing zone and loose packing zone on pebble packing bed of about 60% packing fraction.
- ③ The packing fraction is about 77% by mixture packing of $\phi 1\text{mm}$ Al_2O_3 pebbles and $\phi 5\text{mm}$ Al_2O_3 pebbles under constraint.

* Kawasaki Heavy Industries, LTD.

- ④ The load of container wall increases from 20kg to 200kg by thermal cycle.

Keywords: Tritium Breeder Pebble, Neutron Multiplier Pebble, Fusion Blanket, Packing Fraction, Packing Distribution, Vibration Packing Characteristics, Packing Characteristics Under Thermal Cycle

目 次

1. 序 論	1
2. 実 験	2
2.1 試 料	2
2.2 実験方法	2
3. 実験結果及び考察	4
3.1 充填率に対する壁効果	4
3.2 充填率分布	4
3.3 充填率経時変化	5
3.4 熱サイクルによる充填率変化	6
4. 結 論	7
謝 辞	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Experiments	2
2.1 Sample	2
2.2 Measurement	2
3. Results and Discussion	4
3.1 Effect of the Ratio of Container Diameter to Pebble Diameter on Packing Fraction	4
3.2 Packing Distribution	4
3.3 Vibration Packing Characteristics	5
3.4 Packing Characteristics Under Thermal Cycle	6
4. Conclusion	7
Acknowledgements	8
References	8

1. 序 論

核融合炉増殖ブランケットの設計を行うためには、中性子照射下における基本機能、即ち増殖材領域温度の制御特性、増殖材領域の核特性、トリチウムの生成回収特性及び冷却材へのトリチウム漏洩特性に関する工学データの取得が必要となる。そのために、ペブル充填型多層構造を有するブランケット照射試験体を設計・製作し、*in-situ* 照射試験を J M T R 等を用いて行う。上記基本機能の内、増殖材領域温度の制御特性を評価する上では、ペブルの充填層の実効熱伝導率、いいかえれば、トリチウム増殖材ペブル及び中性子増倍材ペブルの充填率の正確な把握が重要となる。

世界においては、各種の充填率評価試験が行われてきた。まず、McGeary¹⁻³⁾ 及びBenenatiら⁴⁾ は、容器内径 (D) に対するペブル直径 (d) の比 (以後、 D/d 比と称す) が小さくなると充填率が小さくなる特性、いわゆる壁効果に関する研究を行った。それらの研究によると、容器壁ではペブルの第1層は特殊な並び方となり、容器壁に沿って規則的な充填になる傾向があるために、第2層もまた特殊な並び方になり、これが次々の層に影響することが示された。また、密充填と同時にアーチをつくって大きな空間をつくることもあり、このような容器壁における特殊な配列は、数ペブル層あるいはそれ以上におよぶことも明らかにされた。さらに、Smith⁵⁾ 及びHaugheyら⁷⁾ は、1個のペブルに隣接しているペブルの数、すなわち配位数と充填率の相関についての研究を行った。その結果、充填層内におけるペブルの配位数から、充填率を推定できることが明らかになった。また、大きさの異なるペブルの充填に関しては、Horsfield⁸⁾ とHudson⁹⁾ が幾何学的計算により混合充填時における充填率についての研究を行った。その結果、大きさの異なるペブルを混合し、振動充填した場合には一次球と二次球の分離が発生することが明らかになった。

日本が提案している核融合炉ブランケットは、様々な要因によって振動を受けるために、トリチウム増殖材及び中性子増倍材ペブルの充填率が経時変化することが懸念される。また、熱流動及び核的特性の観点から、トリチウム増殖材等のペブル充填層は、均一充填であること、ブランケット容器への充填の再現性が高いこと等が望まれる。さらに、ブランケット容器へのペブル充填法として、トリチウム増殖材ペブルと中性子増倍材ペブルを混合充填するブランケット設計も提案されていることから、それらの混合充填特性についても調べておくことが必要となる。ペブルを高密度充填するための同種異径ペブルの混合充填においても粒径の大きいペブル (以後、一次球と称す) と粒径の小さいペブル (以後、二次球と称す) が均一充填になることが要求される。さらに、Li₂Oトリチウム増殖材を用いた軽水冷却ブランケットでは、低温に保持されているブランケット容器の熱膨張率に比べ、高温状態となるトリチウム増殖材の熱膨張率の方が大きくなる。このため、パルス負荷運転時には、充填層内のペブルの熱膨張により、ブランケット容器に過大な応力が加わる可能性があると共に、トリチウム増殖材等の充填分布に影響を与える可能性がある。

本報告書は、これらの研究開発状況等をふまえて行った、充填率に対する壁効果、充填率分布、充填率経時変化及び熱サイクルによる充填率変化についての試験結果をまとめたものである。

2. 実験

2.1 試料

実験に用いた模擬ペブル及び模擬充填容器を各々Table 1 及びTable 2 に示す。模擬ペブルとしては、 Al_2O_3 ペブルはニッカトウ(株)製HD小球、ガラスペブルは東新理興(株)製ホワイトビーズ、ベアリング鋼ペブルは天辻鋼球製作所(株)製ペブルである。模擬充填容器は、アクリル透明樹脂製、ポリカーボネイト透明樹脂製及びアルミニウム製の充填容器を用いた。また、各実験で用いた模擬ペブル及び模擬充填容器の組合せをTable 3 に示す。

2.2 実験方法

2.2.1 充填率に対する壁効果に関する実験（実験1）

実験で用いた模擬ペブル及び模擬充填容器をTable 3 に示す。

まず、模擬充填容器にペブルを充填し、振動充填前の充填率を測定した。次に、充填容器を振動台に設置し、100Hz の振動を与え、振動充填後の充填率を測定した。以上の測定は、容器内径の異なる6種類の容器と2種類のペブルを適当に組合せ、D/d比を変えて行った。尚、本実験では、振動装置に(株)平工製作所製ふるい振とう機HVS-200を用いた。

2.2.2 充填率分布に関する実験（実験2）

$\phi 1\text{ mm}$ Al_2O_3 ペブルをアルミニウム製の内径65mm、長さ50mmの容器に充填し、ペブル充填層を樹脂により固定後、充填層を縦方向に切断し、断面のペブル面積率を測定した。尚、ペブル充填層固定用樹脂は、脱気固化性の構造用接着剤「LOCTITE R」を用いた。

ペブル充填及び樹脂注入は、以下の2つの方法により行った。1つは、 $\phi 1\text{ mm}$ Al_2O_3 ペブルを充填した容器に樹脂を注入した後、ペブル及び樹脂を混合攪拌し、混合したペブル及び樹脂に対して上方から荷重を加え、充填を強制的に密構造にする方法（以後、荷重充填と称す）である。もう1つは、振動充填（2～3cmの高さからの自然落下による50回のタッピング）したペブルに樹脂を注入する方法である。これら2つの方法について調べることにより、充填方法等のちがいによる影響も検討した。さらに、ペブル直径の充填率分布に与える影響を検討するため、 $\phi 3\text{ mm}$ Al_2O_3 ペブルを上記荷重充填法により充填し、充填率分布を調べた。

また、樹脂は、浸透させるために真空雰囲気において加熱し、充填層のすきまに浸透させ、浸透後に自然冷却して固化した。次に、樹脂により固定した充填ペブル入り容器を縦方向にダイアモンドカッタにより切断し、切断面を写真撮影可能なようにエメリ研磨した後、研磨した切断面のマクロ撮影を行った。そして、マクロ写真からペブル断面についてCambridge Instruments社製画像処理

装置QUANTIMET 920で画像解析し、ペブル断面の面積率を求めた。

2.2.3 充填率経時変化に関する実験（実験3）

(1) 同種同径ペブルの单一充填特性（実験3-1）

実験で用いた模擬充填容器と模擬ペブルをTable 3に示す。また、振動装置としては、実験1と同一のふるい振とう機を用いた。充填条件としては、メッシュをペブル充填層の上層に敷き、円筒状の拘束器具でメッシュを介してペブルを拘束（以後、拘束充填と称す）、あるいは拘束しない（以後、非拘束充填と称す）で行った。

密度の異なるペブルの振動充填特性は、模擬充填容器に各ペブルを別々に充填し、非拘束振動充填前後における充填率を測定した。拘束時及び非拘束時の振動充填特性は、充填状態観察のために着色及び無着色の $\phi 3\text{ mm Al}_2\text{O}_3$ ペブルを交互に同一容器に充填し、まず拘束振動充填時における充填率の経時変化を調べ、その後、拘束を外し、非拘束振動充填時における充填率の経時変化を調べた。調査方法としては、充填率を一定時間経過毎に測定するとともに、充填状態の経時変化は、ビデオ撮影により調べた。

(2) 異種同径ペブルの混合充填特性（実験3-2）

実験で用いた模擬充填容器と模擬ペブルをTable 3に示す。また、振動装置としては、実験1と同一のふるい振とう機を用いて、 $\phi 3\text{ mm Al}_2\text{O}_3$ ペブルと $\phi 3\text{ mm ベアリング鋼}$ ペブルの異種同径ペブルを交互に同一容器に充填し、拘束振動充填及び非拘束振動充填を行い、充填率を測定するとともに、混合状態をビデオ撮影により調べた。

(3) 同種異径ペブルの混合充填特性（実験3-3）

実験で用いた模擬充填容器と模擬ペブルをTable 3に示す。一次球として $\phi 5\text{ mm Al}_2\text{O}_3$ ペブル、二次球として $\phi 1\text{ mm Al}_2\text{O}_3$ ペブルを用いた。また、振動装置としては、実験1と同一のふるい振とう機を用いた。

まず、模擬充填容器に $\phi 5\text{ mm Al}_2\text{O}_3$ ペブルを充填し、非拘束振動時における充填率を測定した。次に、 $\phi 1\text{ mm Al}_2\text{O}_3$ ペブルの透過可能な大きさのメッシュを $\phi 5\text{ mm Al}_2\text{O}_3$ ペブルの上層に敷き、円筒状の拘束器具でメッシュを介して $\phi 5\text{ mm Al}_2\text{O}_3$ ペブルを拘束し、振動を与えた後充填率を測定した。その後、メッシュの上から $\phi 1\text{ mm Al}_2\text{O}_3$ ペブルを追加充填し、拘束振動充填時及び非拘束振動充填時における充填率を測定し、合せて混合充填特性をビデオにより観察した。

2.2.4 熱サイクルによる充填率変化に関する実験（実験4）

熱膨脹／熱収縮挙動を機械的に模擬し、模擬熱サイクル負荷時の充填容器への壁荷重と充填率を評価した。実験に用いた模擬充填容器と模擬ペブルをTable 3に示す。熱膨脹／熱収縮挙動の模擬は、模擬充填容器に各ペブルを別々に充填し、アクリル製の蓋をしてペブルを拘束した後、両側面の壁から同時に変位を与えることにより行った。実験の模式図をFig. 1に示す。そして、模擬熱サイクル負荷時における壁荷重と充填率を測定した。充填容器をステンレス鋼、ペブルをLi₂Oと想定して、ステンレス鋼の充填容器及びLi₂Oペブルの温度範囲を各々30～150°C及び30～600°C、ステン

レス鋼及び Li_2O の熱膨脹率を各々 16.2×10^{-6} 及び 33.6×10^{-6} とすると、ステンレス鋼の伸びが 0.136mm 、 Li_2O ペブルの伸びが、 1.346mm になり、この各温度領域における熱膨脹差から片側の機械振幅を 0.6mm に設定し、22分間模擬熱サイクルを負荷した。

3. 実験結果及び考察

3.1 充填率に対する壁効果

McGearyは、粒度をふるいでよくそろえた鋼ペブルを用いて D/d 比を 1 から 200 まで変化させた時の充填率を実験で求め、さらに実験をもとにした経験式から求めた充填率との比較を行っている。McGeary の結果を Fig. 2 に示す。鋼ペブルによる実験値を太い実線、実験をもとにした経験式から求めた計算値を細い実線（数字は最下層のペブル数）で示した。さらに、LevaとGrummer⁵⁾ のガラス、鋼及び磁製ペブルを用いてハンマで容器を打って充填させた時の実験値を破線で示してある。McGeary の結果から、 D/d 比が 20 以上で充填率が 62.5% とほぼ一定の値を示したのに対し、LevaとGrummerの結果では、 D/d 比に対して充填率が比例的な増加を示した。

一方、本実験により得た D/d 比に対する振動前後の充填率に関する生データを Table 4 に、それらの相関を Fig. 3 に示す。本結果から、振動装置により振動を負荷することによって、充填率が約 3 % 上昇することが明らかになった。さらに、 D/d 比が 3 付近では充填率が 55% 前後にとどまるが、 D/d 比が 10 以上では充填率がほぼ 62～63% 程度に上昇し、一定することも明らかになった。

一方、国際熱核融合実験炉 (ITER) における日本のブランケット設計では、充填率 60% が設計値として採用されている。従って、照射試験体設計においてもこの充填率を確保するためには D/d 比が 10 以上必要になることが明らかになった。尚、本実験では、100Hz の振動を充填層に与えたが、材料試験炉（以後、JMTTR と記す）の燃料要素は炉心冷却水により 150～200Hz の振動を受けている¹⁰⁾。JMTTR における照射試験では、充填層内のペブル充填率が本試験結果同様に変化すると考えられるが、大きな充填率変化が認められなかったことから、試験体の照射特性への影響はないと思われる。また、実機の核融合炉増殖ブランケットにおいても、冷却水等による振動を受けると思われるため、振動による充填率変化には十分留意する必要がある。

3.2 充填率分布

$\phi 1\text{ mm } \text{Al}_2\text{O}_3$ ペブルを荷重充填及び振動充填した容器の中央部及び壁近傍部の縦断面観察箇所を Fig. 4 に、本実験により得た $\phi 1\text{ mm } \text{Al}_2\text{O}_3$ ペブルを荷重充填した容器の中央部及び壁近傍部の縦断面観察結果を Fig. 5 に、 $\phi 1\text{ mm } \text{Al}_2\text{O}_3$ ペブルを振動充填した容器の中央部及び壁近傍部の縦断面観察結果を Fig. 6 に、 $\phi 3\text{ mm } \text{Al}_2\text{O}_3$ ペブルを荷重充填した容器全体の縦断面観察結果を Fig. 7 に、面

レス鋼及び Li_2O の熱膨脹率を各々 16.2×10^{-6} 及び 33.6×10^{-6} とすると、ステンレス鋼の伸びが 0.136mm 、 Li_2O ペブルの伸びが、 1.346mm になり、この各温度領域における熱膨脹差から片側の機械振幅を 0.6mm に設定し、22分間模擬熱サイクルを負荷した。

3. 実験結果及び考察

3.1 充填率に対する壁効果

McGearyは、粒度をふるいでよくそろえた鋼ペブルを用いて D/d 比を 1 から 200 まで変化させた時の充填率を実験で求め、さらに実験をもとにした経験式から求めた充填率との比較を行っている。McGeary の結果を Fig. 2 に示す。鋼ペブルによる実験値を太い実線、実験をもとにした経験式から求めた計算値を細い実線（数字は最下層のペブル数）で示した。さらに、Leva と Grummer⁵⁾ のガラス、鋼及び磁製ペブルを用いてハンマで容器を打って充填させた時の実験値を破線で示してある。McGeary の結果から、 D/d 比が 20 以上で充填率が 62.5% とほぼ一定の値を示したのに対し、Leva と Grummer の結果では、 D/d 比に対して充填率が比例的な増加を示した。

一方、本実験により得た D/d 比に対する振動前後の充填率に関する生データを Table 4 に、それらの相関を Fig. 3 に示す。本結果から、振動装置により振動を負荷することによって、充填率が約 3 % 上昇することが明らかになった。さらに、 D/d 比が 3 付近では充填率が 55% 前後にとどまるが、 D/d 比が 10 以上では充填率がほぼ 62~63% 程度に上昇し、一定することも明らかになった。

一方、国際熱核融合実験炉 (ITER) における日本のブランケット設計では、充填率 60% が設計値として採用されている。従って、照射試験体設計においてもこの充填率を確保するためには D/d 比が 10 以上必要になることが明らかになった。尚、本実験では、100Hz の振動を充填層に与えたが、材料試験炉（以後、JMTTR と記す）の燃料要素は炉心冷却水により 150~200Hz の振動を受けている¹⁰⁾。JMTTR における照射試験では、充填層内のペブル充填率が本試験結果同様に変化すると考えられるが、大きな充填率変化が認められなかったことから、試験体の照射特性への影響はないと思われる。また、実機の核融合炉増殖ブランケットにおいても、冷却水等による振動を受けると思われるため、振動による充填率変化には十分留意する必要がある。

3.2 充填率分布

$\phi 1\text{ mm } \text{Al}_2\text{O}_3$ ペブルを荷重充填及び振動充填した容器の中央部及び壁近傍部の縦断面観察箇所を Fig. 4 に、本実験により得た $\phi 1\text{ mm } \text{Al}_2\text{O}_3$ ペブルを荷重充填した容器の中央部及び壁近傍部の縦断面観察結果を Fig. 5 に、 $\phi 1\text{ mm } \text{Al}_2\text{O}_3$ ペブルを振動充填した容器の中央部及び壁近傍部の縦断面観察結果を Fig. 6 に、 $\phi 3\text{ mm } \text{Al}_2\text{O}_3$ ペブルを荷重充填した容器全体の縦断面観察結果を Fig. 7 に、面

積率の測定結果をTable 5に示す。

まず、壁面に接しているペブルは規則的な正方配列、あるいは单斜方配列を形成していない。しかしながら、Fig. 7から、 $\phi 3\text{ mm Al}_2\text{O}_3$ ペブル切断面の壁近傍のペブル接触が縦方向に比較的揃っていることからも、单斜方配列よりも正方配列に近いものと思われる。

また、荷重充填を行った試験体の縦断面観察結果 (Fig. 5)によれば、充填層中央部においても、必ずしも規則的充填構造は形成されていない。部分的には、直径相当大のペブルの規則配列面、あるいは大断面と小断面の規則配列が観察されるが、規則配列領域は狭く、局所に留まっている。従って、本実験においては、荷重の負荷によって、ランダム充填構造があまり改善されなかったものと考えられる。タッピングによる振動充填を行った試験体の縦断面観察結果 (Fig. 6)からは、全体的に荷重充填試験体とあまり差は認められず、局所的な規則配列も同様であった。

Smithは、半径3.78mmの鉛弾を直径80~130mmのビーカに入れ、20%の酢酸水溶液を注いだ後、注意ぶかく溶液をぬき、鉛弾の各接触点に液がリング状に残留したまま数時間放置した。そして、接触点に残った白い塩基性酢酸鉛の数を容器壁の近くは避けて900~1600個の鉛弾に対して数え、配位数と充填率との相関について調べた。その結果をFig. 8に示す。本実験では、Smithの研究結果を用いて充填率評価を行った。本充填率分布観察結果から得た配位数はおよそ6である。しかしながら、ペブル欠落部の観察から、切断面の表側と裏側で各々少なくとも1個のペブルと接触するため、約8と見込まれる。その場合、空間率が42%，すなわち、充填率は58%程度となる。従って、本実験で得た配位数から求めた充填率推定値はおよそ60%となり、おおむね実測値と一致したことから、配位数からの充填率評価の見通しが得られた。

3.3 充填率経時変化

3.3.1 同種同径ペブルの单一充填特性

ペブル密度と充填率の関係をFig. 9に、ペブルの表面粗さと充填率の関係をFig. 10に、各ペブルの充填率測定結果をTable 6に、 $\phi 3\text{ mm Al}_2\text{O}_3$ ペブルの拘束及び非拘束振動充填時における充填率経時変化をFig. 11及びその生データをTable 7に、 $\phi 3\text{ mm Al}_2\text{O}_3$ ペブルの拘束及び非拘束振動充填時におけるペブル充填状態をFig. 12に示す。

Fig. 9から、ガラスペブルとベアリング鋼ペブルの充填率がほぼ同じになり、充填率がペブル密度に依存しないことが明らかになった。また、 Al_2O_3 ペブルの充填率がガラスペブル及びベアリング鋼ペブルに比べて低い充填率になった原因は、Fig. 10に示したように Al_2O_3 ペブルの表面粗さが他のペブルに比べて非常に大きいためである。

Fig. 11から、拘束振動充填時及び非拘束振動充填時共に約100秒後にはほぼ一定の充填率になり、充填率は、拘束振動充填時で約61%，拘束を解除することにより約59%と、拘束及び非拘束振動充填では充填率に大きな差は認められなかった。しかし、Fig. 12で示すように、非拘束振動充填時ににおいてペブルの移動が確認された。

3.3.2 異種同径ペブルの混合充填特性

$\phi 3\text{ mm Al}_2\text{O}_3$ ペブルと $\phi 3\text{ mm}$ ベアリング鋼ペブルの拘束及び非拘束振動充填時におけるペブル充填状態をFig. 13に示す。Fig. 13より、拘束振動充填時では、ペブルの移動が抑制され、異材料同士の混合が発生しないことが明らかになった。一方、非拘束振動充填時では、遍在化までには至らないが、容器内においてペブルの混合が確認された。

3.3.3 同種異径ペブルの混合充填特性

一次球のみ及び二次球追加充填時の充填率変化をTable 8に、混合充填状態をFig. 14に示す。Table 8から、一次球のみの拘束振動充填では、10分間で充填率が0.5%ほど若干上昇したが、二次球充填による拘束振動充填では59%から77%へと約18%増加し、この高密度充填が拘束条件下で常に一定の値を確保できることが明らかになった。一方、拘束を解除すると一次球と二次球の分離が始まり、充填率は63%まで低下した。

従って、同種異径ペブルを照射試験体に充填する場合、一定照射条件下で照射試験を行うためには、拘束条件下で照射試験を行う必要がある。

3.4 熱サイクルによる充填率変化

ペブル直径に対する模擬熱サイクル負荷前後の充填率変化をFig. 15及びその生データをTable 9に、試験後の壁荷重をFig. 16及びその生データをTable 10に示す。

Fig. 15から、模擬熱サイクルを負荷することによって充填率が約3%程度上昇することが明らかになった。そして、Fig. 16から、模擬熱サイクル負荷後の壁荷重は、ペブル直径が小さいほど大きいことが明らかになった。これは、ペブル粒径が小さくなると単位体積当たりの摩擦面積（理想状態では点接触点数）が多くなり、荷重が大きくなるためと考えられる。従って、充填ペブルの粒径を小さくする場合、スイープガスの圧力損失の増加に加え、トリチウム増殖材の熱膨脹によるブランケット容器壁負荷が増加することを考慮する必要がある。

模擬熱サイクル負荷前のペブルは拘束状態であったが、模擬熱サイクルを負荷することによって容器上部に空間が発生して非拘束状態になった。従って、容器上部の空間にペブルを追加充填し、模擬熱サイクル下における壁荷重と充填率との関係を調べた。

ペブル追加充填時の壁荷重変化をTable 11及びFig. 17に、充填率と壁荷重の関係をTable 12及びFig. 18に示す。Fig. 17及び18から、ペブル追加充填後、充填率の向上に伴い壁荷重が上昇し、追加前よりも追加後の壁荷重が約20kgから約200kgに1桁程度上昇することが明らかになった。従って、ブランケット内のトリチウム増殖材の充填率を高める場合、壁にかかる負荷荷重が、充填しているペブルの拘束状態によって大幅に異なることを考慮する必要がある。

4. 結 論

(1) 充填率に対する壁効果

D/d 比 3～20の範囲で振動充填前後の充填率測定を行い、充填率壁効果について試験検討を行った結果、 D/d 比が 3付近では充填率が55%前後に留まるが、 D/d 比が10付近ではほぼ62～63%の充填率を維持できることが明らかになった。今後は、充填率のペブル表面性状に対する依存性及び壁近傍のペブル充填構造について評価するとともに、実材料（酸化リチウム等）による確認試験等について詳細な検討を行う必要がある。

(2) 充填率分布

充填層断面観察から、配位数は約 8 であり、その配位数と Smith の評価式から、充填率が約 60% であることが明らかになった。さらに、その充填層における中央部と壁近傍部のペブル充填状態は、ともにミクロ的には規則構造ではなく、密充填部と疎充填部が存在する。今後は、さらに充填方法及びペブル材料依存性について評価するとともに、実材料（酸化リチウム等）による充填率分布の再現性試験を行う必要がある。

(3) 充填率経時変化

同種同径ペブルの拘束振動充填と非拘束振動充填における充填率は、有意義な差は認められなかった。そして、充填率はペブル密度ではなく、ペブル表面性状による影響を受けることが明らかになった。また、拘束時における同種異径ペブルの混合充填では、充填率が59%から77%に増加し、二次球充填により充填率を向上できることが明らかになった。尚、拘束を解除すると一次球と二次球の分離が発生するため、二次球充填による高密度化を行うためには一次球の拘束条件下において充填する必要がある。一方、異種同径ペブルの混合充填特性では、拘束時には異種材料の混合は発生しないが、非拘束時には材料の偏在化までは至らないが異種材料が混合することが明らかになった。今後は、充填率のペブル表面性状依存性及び最適多次球充填条件について評価するとともに、実材料（酸化リチウム等）による試験を行う必要がある。

(4) 熱サイクルによる充填率変化

模擬熱サイクル試験後、充填率が 3 %程度上昇し、ペブル直径が小さいほど定常壁荷重が大きくなることが明らかになった。また、振動で発生した空間部に周期的にペブルを追加充填して振動充填試験を行った結果、追加充填前に比べて追加充填後では、壁荷重が約 20kg から約 200kg と 1 衍程度上昇するため、高密度充填の場合、容器壁に与える荷重を考慮する必要がある。今後は、実機熱サイクル条件下あるいは振動条件下における壁荷重評価を行う必要がある。

謝 辞

本報告書をまとめる上で、材料試験炉部長斎藤実氏、照射第1課長代理伊藤治彦氏にご助言を頂いた。

記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Miwa S. : "Funryutaikougaku", Asakurashoten (1972) [in Japanese]
- 2) Iiya K. : "Funtaikougaku Handbook", Asakurashoten (1965) [in Japanese]
- 3) McGeary, R.K. : J. Am. Ceram. Soc., 44 No.10 513 (1961)
- 4) Benenati, R.F. and Brosilow, C.B. : A. I. Ch. E. J., 8 No.3 359 (1962)
- 5) Leva, M. and Grummer, M. : Trans. Am. Inst. Chem. Eng., 43 No.12 713 (1947)
- 6) Smith, W.O. et al. : Phys. Rev., 34 1271 (1929)
- 7) Haughey, D.P. and Beveridge, G.S.G. : Can. J. Chem. Eng., 47 No.2 130 (1969)
- 8) Horsfield, H.T. : J. Soc. Chem. Ind., 107 (1934)
- 9) Hudson, D.R. : J. Appl. Phy., 20 154 (1949)
- 10) Nippon Atomic Industry Group : "JMTR Douteki Mock-up Shiken Houkokusyo" (1966) [in Japanese]

謝 辞

本報告書をまとめる上で、材料試験炉部長斎藤実氏、照射第1課長代理伊藤治彦氏にご助言を頂いた。

記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Miwa S. : "Funryutaikougaku", Asakurashoten (1972) [in Japanese]
- 2) Iiya K. : "Funtaikougaku Handbook", Asakurashoten (1965) [in Japanese]
- 3) McGeary, R.K. : J. Am. Ceram. Soc., 44 No.10 513 (1961)
- 4) Benenati, R.F. and Brosilow, C.B. : A. I. Ch. E. J., 8 No.3 359 (1962)
- 5) Leva, M. and Grummer, M. : Trans. Am. Inst. Chem. Eng., 43 No.12 713 (1947)
- 6) Smith, W.O. et al. : Phys. Rev., 34 1271 (1929)
- 7) Haughey, D.P. and Beveridge, G.S.G. : Can. J. Chem. Eng., 47 No.2 130 (1969)
- 8) Horsfield, H.T. : J. Soc. Chem. Ind., 107 (1934)
- 9) Hudson, D.R. : J. Appl. Phy., 20 154 (1949)
- 10) Nippon Atomic Industry Group : "JMTR Douteki Mock-up Shiken Houkokusyo" (1966) [in Japanese]

Table 1 The size and the materials of pebbles

Pebble Number	A-1	A-3	A-5	B-3	B-8	G-3
Diameter(mm)	1	3	5	3	8	3
Materials	Al_2O_3			Bearing Steel SUJ2	Glass	
Density(g/cm ³)	3.6			7.8	2.5	

Table 2 The size and the materials of containers

Container Number	C-26	C-36	C-46	C-56	C-64	C-71	C-65	C-70
Inner Diameter(mm)	26	36	46	56	64	71	65	(size) 70×70× ["] 100
Length(mm)	200					50		
Materials	Acrylic Resin					Aluminium	Polycarbonate	

Table 3 Experiment method

Experiment number	Pebbles*	Containers*	Packing method
1	B-3 B-8	C-26, C-36 C-46, C-56 C-64, C-71	No-constraint, no vibration
			No-constraint, with vibration
2	A-1	C-65	Constraint, no vibration
			No-constraint, with vibration
	A-3	C-65	Constraint, no vibration
3	A-3 B-3 C-3	C-71	No-constraint, no vibration
			No-constraint, with vibration
		C-71	No-constraint, with vibration
	B-3		Constraint, with vibration
	A-3 B-3	C-71	No-constraint, width vibration
			Constraint, with vibration
3-3	A-1 A-5	C-71	No-constraint, with vibration
			Constraint, with vibration
	A-1 A-3 A-5	C-70	No-constraint, with mechanical fluctuation corresponding to thermal cycle

Experiment 1 : The packing fraction vs. ratio of container diameter(D) and pebble diameter(d)

Experiment 2 : The packing distribution

Experiment 3 : The vibration packing characteristics

Experiment 3-1 : The vibration packing characteristics of one-component pebbles

Experiment 3-2 : The vibration packing characteristics of two-component pebbles

Experiment 3-3 : The vibration packing characteristics of two-size pebbles

Experiment 4 : The packing characteristics under thermal cycle

* : See Table 1 and Table 2

Table 4 Effect of the packing fraction vs. the ratio of container diameter(D) to pebble diameter(d)

D/d	Packing fraction (%)			
	before vibration		after vibration	
	Measurment	Average	Measurment	Average
3.20	54.4	54.3	55.3	55.0
	54.7		55.2	
	53.7		54.5	
4.40	56.0	56.0	57.6	57.1
	56.6		57.0	
	55.5		56.6	
5.76	56.8	56.3	57.2	57.6
	55.6		58.1	
	56.5		57.4	
6.97	57.6	57.9	58.3	58.4
	58.0		58.3	
	58.0		58.5	
7.99	60.9	60.7	61.7	61.5
	60.6		61.1	
	60.5		61.7	
8.00	56.0	56.6	57.1	58.2
	56.0		57.8	
	57.6		59.7	
8.94	56.4	56.9	57.3	58.8
	57.4		59.8	
	57.0		59.2	
11.0	61.7	61.9	62.6	62.6
	62.0		62.7	
	61.9		62.6	
14.4	60.3	60.4	61.5	61.5
	60.4		61.5	
	60.6		61.5	
17.4	60.7	60.7	61.7	61.9
	60.8		61.8	
	60.7		62.1	
20.0	59.1	59.4	61.8	61.9
	59.7		61.7	
	59.5		62.1	
22.4	59.0	59.2	62.1	62.2
	59.7		62.6	
	58.9		61.9	

Table 5 The packing distribution in a container filled with $\phi 1\text{mm}$ Al_2O_3 and $\phi 3\text{mm}$ Al_2O_3 pebbles on constraint and vibration

Figure Number	Fig. 5	Fig. 6	Fig. 7
Pebble Diameter(mm)	1	1	3
Packing Method	Constraint	Vibration	Constraint
Container Inside Diameter(mm)	65	65	65
Cross Section Rate(%) (Center:10mm×10mm) (Wall:10mm×1.5mm)	62.7 57.9	65.9 66.9	61.6 —

Table 6 Effect of the packing fraction on $\phi 3\text{mm}$ Al_2O_3 , $\phi 3\text{mm}$ glass and $\phi 3\text{mm}$ bearing steel pebbles before vibration and after vibration

Pebble	Pebble surface roughness R_a^* (μm)	Packing fraction (%)			
		before vibration		after vibration	
		Measurment	Average	Measurment	Average
$\phi 3\text{mm}$ Glass	0.32	60.3	60.1	62.4	62.5
		59.9		62.6	
		60.1		62.6	
$\phi 3\text{mm}$ Al_2O_3	1.12	58.7	57.8	59.5	59.6
		57.3		59.2	
		57.3		60.1	
$\phi 3\text{mm}$ bearing steel	0.007	59.0	59.2	62.1	62.2
		59.7		62.6	
		58.9		61.9	

*) Cut off value is 0.08mm.

Table 7 Effect of the vibration packing
of $\phi 3\text{mm}$ Al_2O_3 pebbles under
constraint and under no-constraint

Time(s)	Packing fraction(%)	Constraint condition
0	59.7	Constraint
120	60.3	
300	60.3	
600	60.4	
610	59.7	No-constraint
630	59.9	
660	59.8	
720	59.2	
900	59.2	
1200	59.2	

Table 8 Effect of the vibration packing
of two-size pebbles

Packing pebble	Vibration packing conditon	Constraint condition	Packing fraction (%)
Primary pebble ($\phi 5\text{mm}$ Al_2O_3)	before Vibration	No-constraint	58.5
	after Vibration	Constraint	59.0
Secondary pebble ($\phi 1\text{mm}$ Al_2O_3)	after Vibration	Constraint	77.2
	after Vibration	No-constraint	63.2

Weight of primary pebble : 927.6 g

Weight of secondary pebble : 291.6 g

Table 9 Effect of the packing fraction on $\phi 1\text{mm}$ Al_2O_3 , $\phi 3\text{mm}$ Al_2O_3 and $\phi 5\text{mm}$ Al_2O_3 pebbles packing before thermal cycle and after thermal cycle

Pebble	Packing fraction(%)	
	before test	after test
$\phi 1\text{mm}$ Al_2O_3	59.4	62.5
$\phi 3\text{mm}$ Al_2O_3	58.5	60.5
$\phi 5\text{mm}$ Al_2O_3	59.8	61.1

Table 10 Effect of load on $\phi 1\text{mm}$ Al_2O_3 , $\phi 3\text{mm}$ Al_2O_3 and $\phi 5\text{mm}$ Al_2O_3 pebbles packing after thermal cycle

Pebble	Load(kg)	
	Measurement	Average
$\phi 1\text{mm}$ Al_2O_3	32.0	27.3
	22.5	
$\phi 3\text{mm}$ Al_2O_3	21.5	16.9
	12.2	
$\phi 5\text{mm}$ Al_2O_3	17.5	15.3
	13.0	

Table 12 Effect of load on $\phi 3\text{mm}$ Al_2O_3 pebbles additional packing after thermal cycle

Pebble addition	Load(kg)		Packing fraction (%)
	Measurement	Average	
Initial packing	22.5	16.5	60.5
	10.5		
1st addition	117.5	101.3	61.1
	85.0		
2nd addition	148.8	132.7	61.3
	116.5		
3rd addition	212.5	200.0	61.5
	187.5		

Table 11 Effect of load on φ3mm Al₂O₃ pebbles additional packing under thermal cycle

Test cycle	Load(kg)	Pebble addition	Test cycle	Load(kg)	Pebble addition	Test cycle	Load(kg)	Pebble addition
1	190.0		217	143.8		433	165.0	
2	172.5		218	143.8		434	165.0	
3	156.3		219	142.5		435	165.0	
4	143.8		220	141.3		436	164.0	
5	130.0		221	140.0		560	145.5	
6	120.0		222	140.0		584	149.0	
7	108.8		223	138.8		627	148.8	
8	101.3		224	137.5		628	240.0	3rd Add.
9	90.0		225	138.8		629	238.8	
10	82.5		226	137.5		630	238.0	
11	76.3		227	137.5		631	237.5	
12	70.0		351	118.0		632	238.8	
13	65.0		375	117.5		633	237.5	
14	57.5		418	117.5		634	237.5	
15	52.5		419	177.5	2nd Add.	635	236.5	
16	51.3		420	175.0		636	236.5	
17	45.0		421	172.5		637	237.5	
18	40.0		422	171.3		638	236.3	
142	22.5		423	170.0		639	236.5	
166	22.5		424	169.0		640	235.0	
209	22.5		425	168.8		641	235.0	
210	167.5	1st Add.	426	167.5		642	235.0	
211	158.8		427	168.8		643	235.0	
212	155.0		428	167.5		644	235.0	
213	152.5		429	167.5		645	233.8	
214	150.0		430	166.3		769	215.0	
215	147.5		431	165.0		793	212.5	
216	146.3		432	165.0		836	212.5	

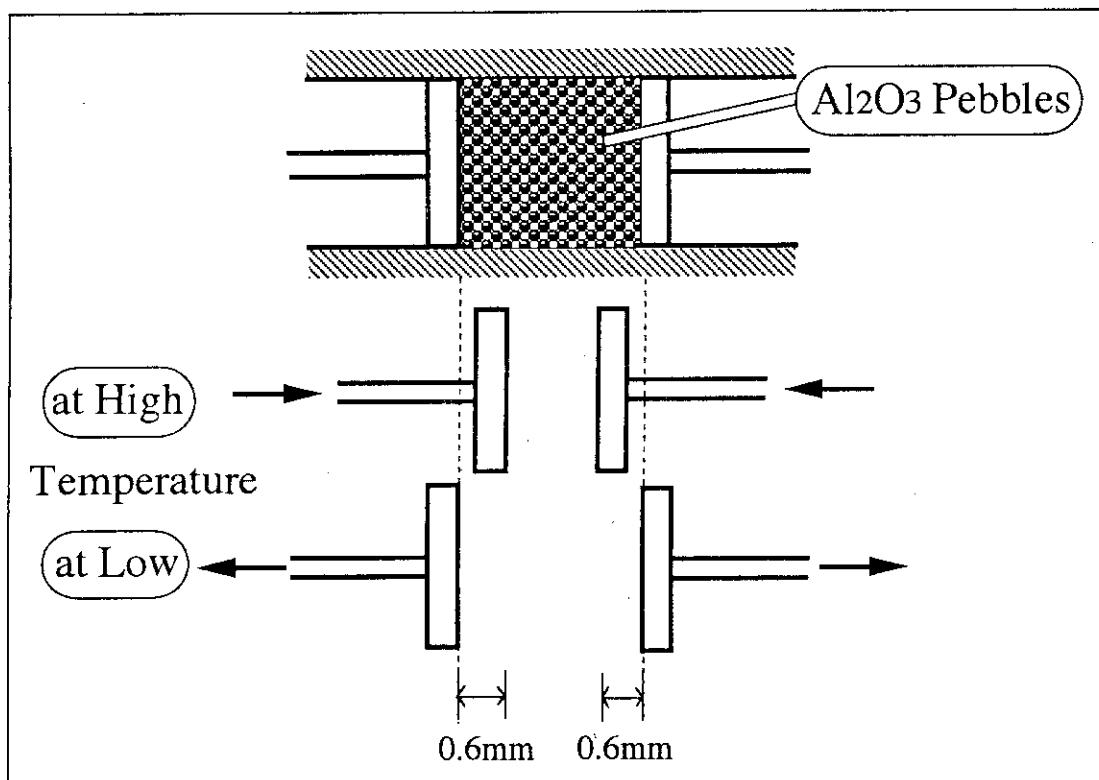


Fig. 1 Equipment for thermal cycle

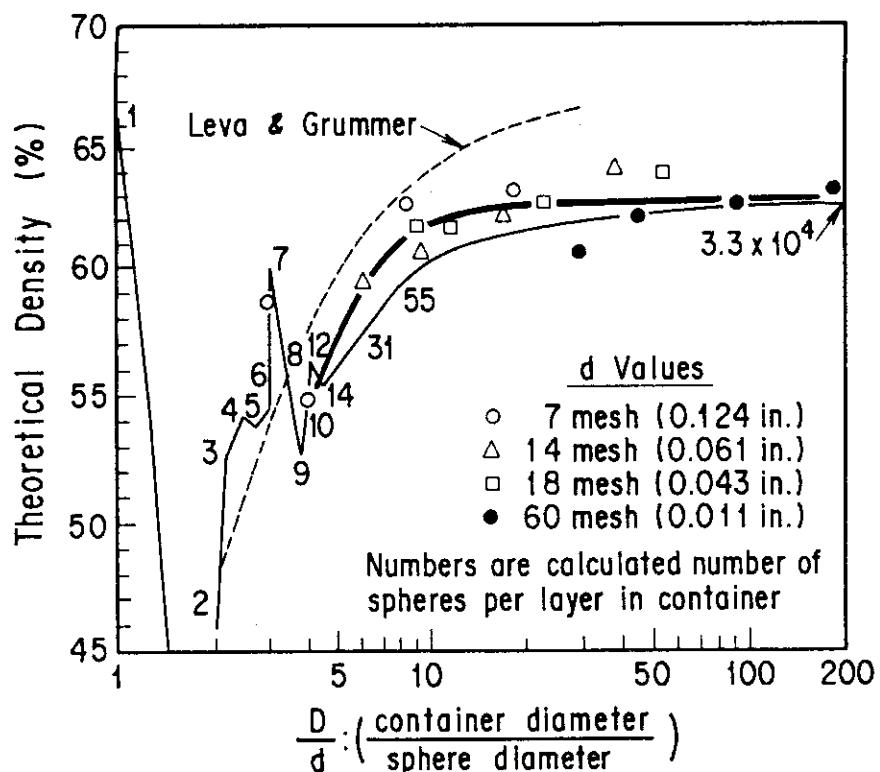


Fig. 2 The packing fraction vs. the ratio of container diameter(D) to pebble diameter(d)
 (McGeary, R.K.: J. Am. Ceram. Soc., 44
 No.10 513 (1961))

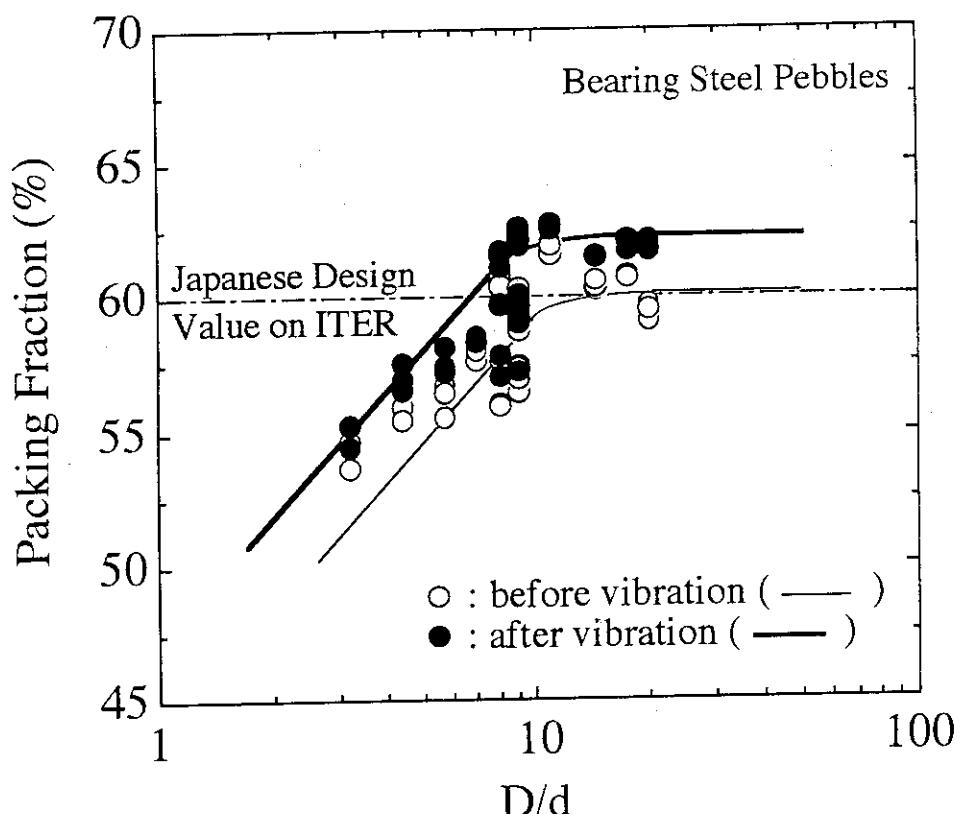


Fig. 3 The packing fraction vs. the ratio of container diameter(D) to pebble diameter(d)

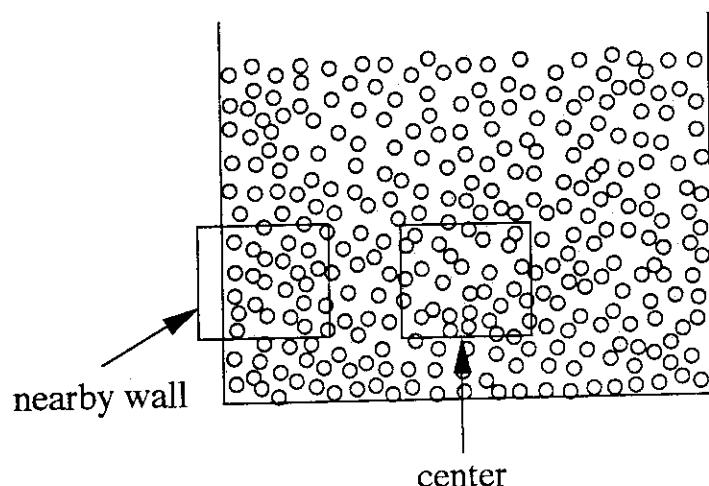


Fig. 4 Image analysing area of packing pebble bed under constraint and under vibration

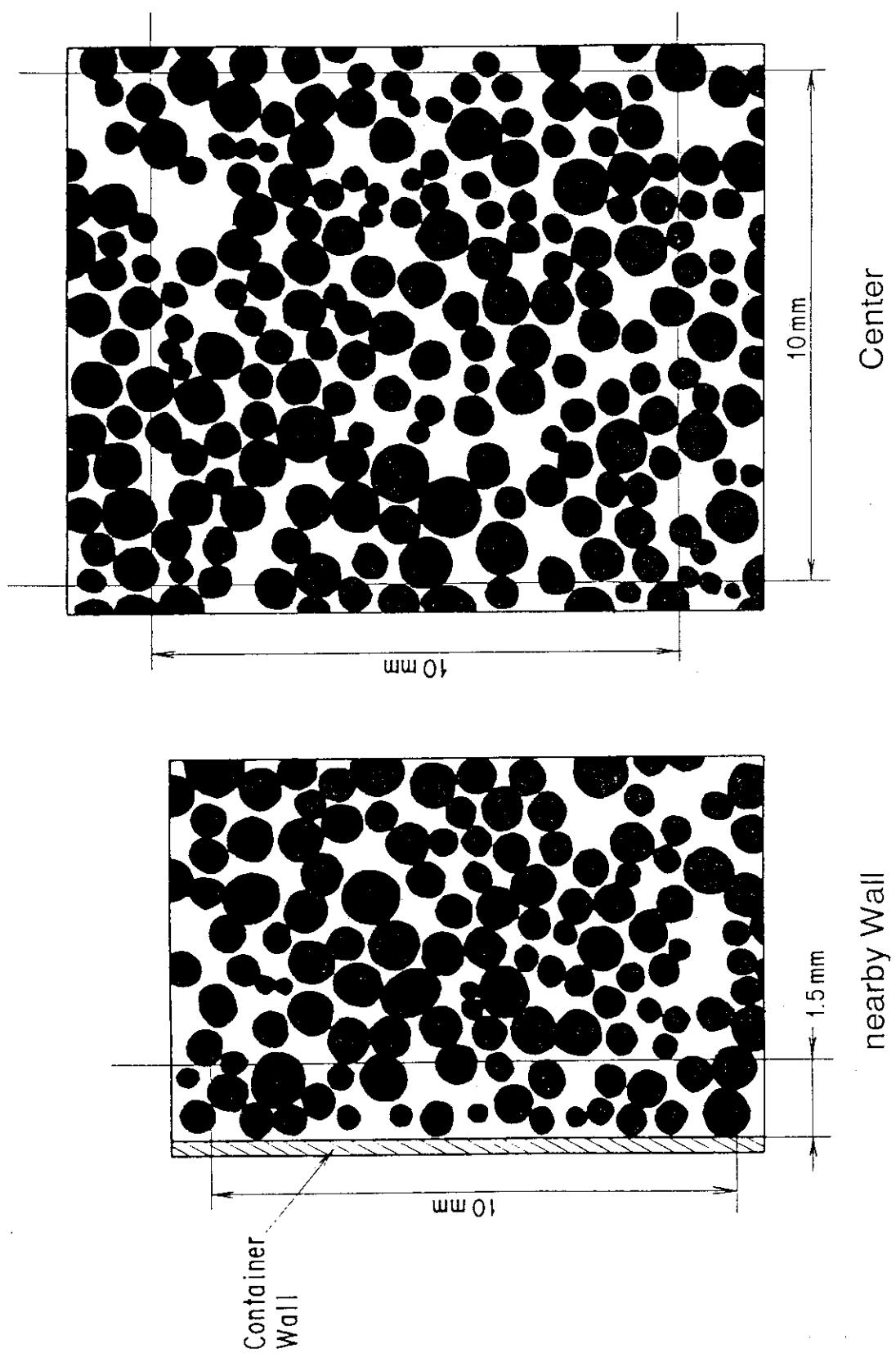


Fig. 5 Image analysing area nearby wall(10mm×1.5mm) and center part(10mm×10mm)
filled with $\phi 10\text{mm}$ Al_2O_3 pebbles under constraint

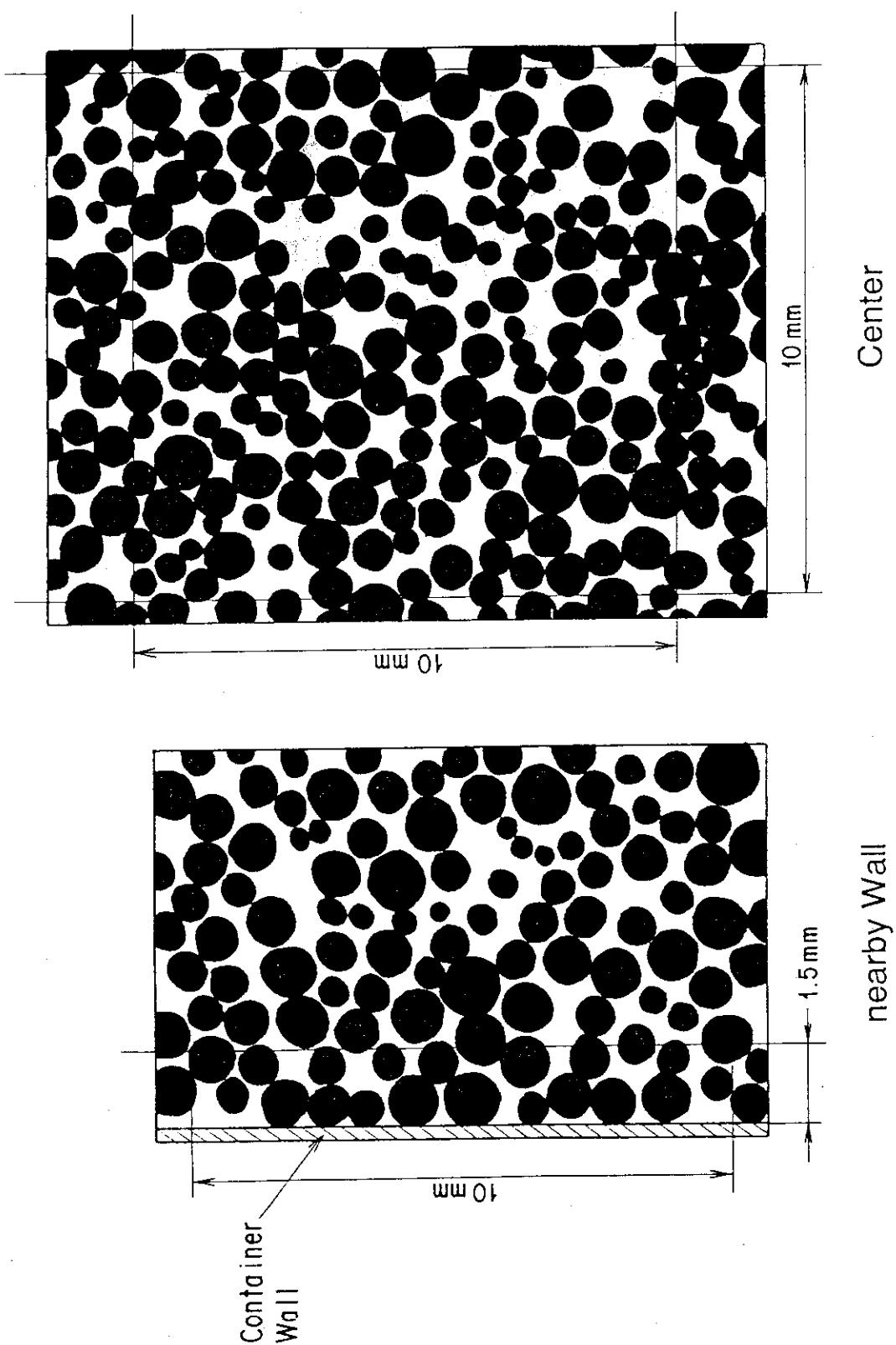


Fig. 6 Image analyzing area nearby wall($10\text{mm} \times 1.5\text{mm}$) and center part($10\text{mm} \times 10\text{mm}$) filled with $\phi 1\text{mm}$ Al_2O_3 pebbles under vibration

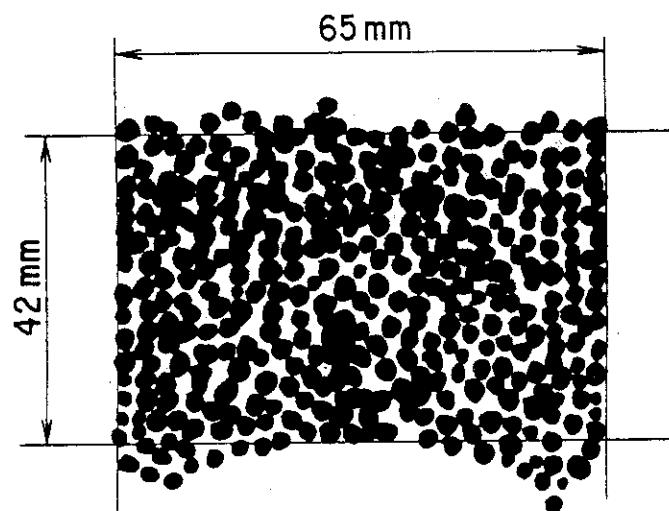


Fig. 7 Image analysing area ($65\text{mm} \times 42\text{mm}$) filled with $\phi 3\text{mm}$ Al_2O_3 pebbles under constraint

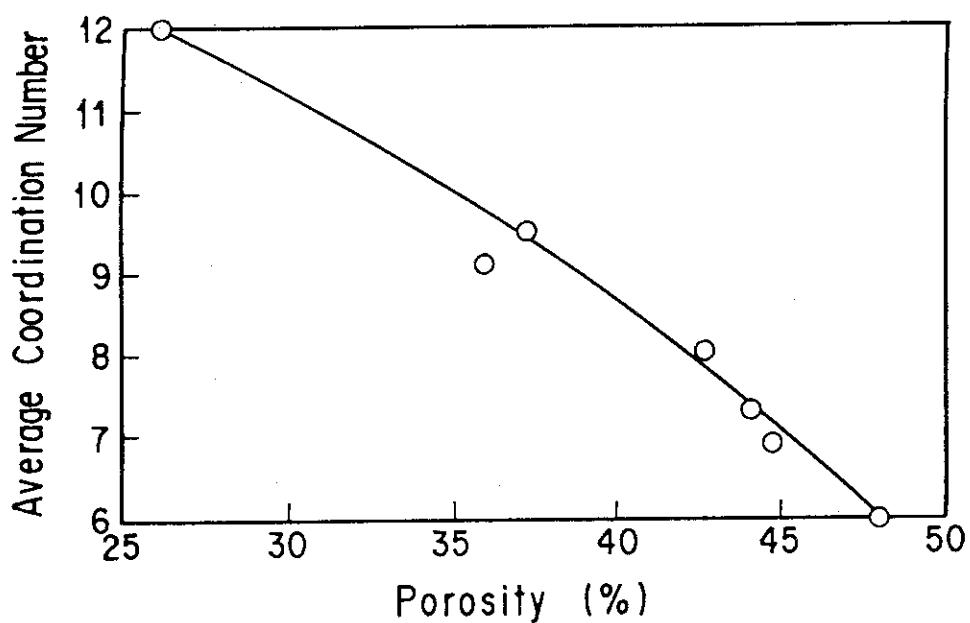


Fig. 8 Relation between average coordination number and porosity
(Smith, W.O. et al.: Phys. Rev., 34 1271 (1929))

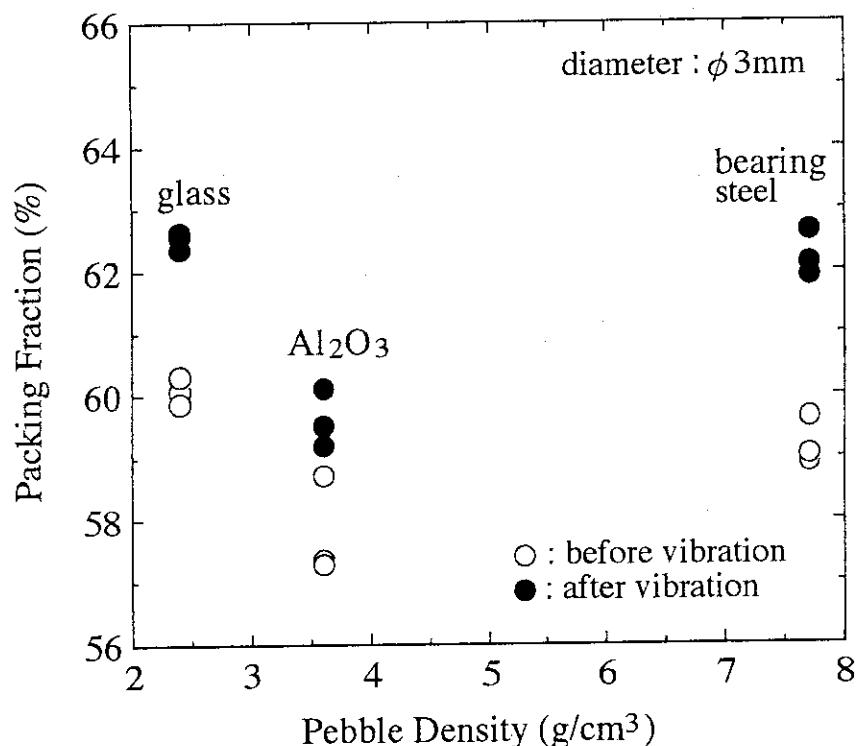


Fig. 9 Relation between the packing fraction and pebble density under no-constraint before vibration and after vibration

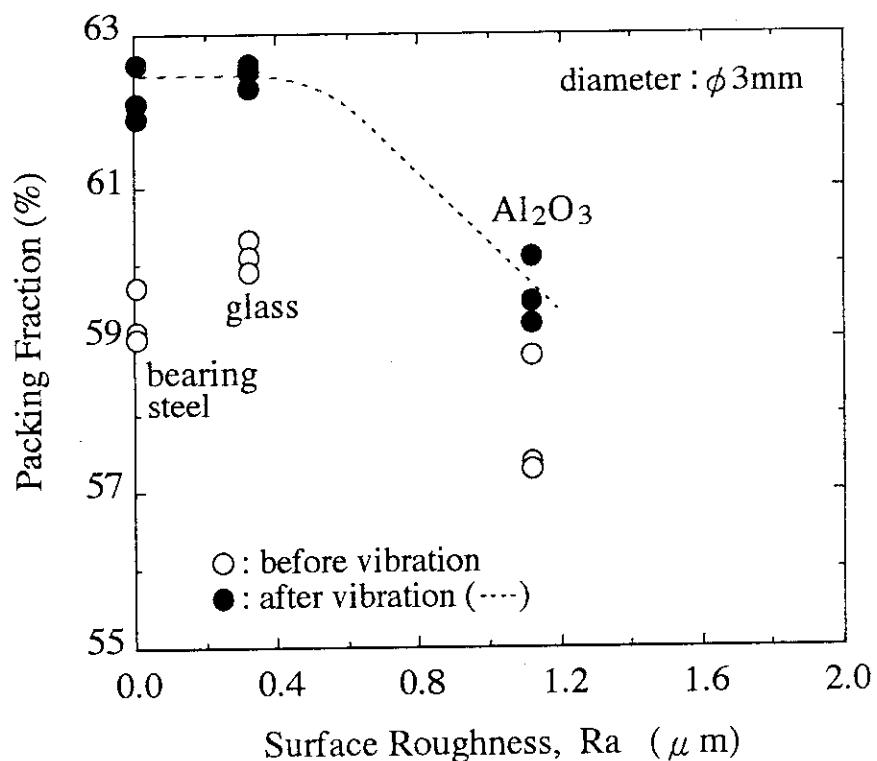


Fig. 10 Relation between the packing fraction and surface roughness under no-constraint before vibration and after vibration

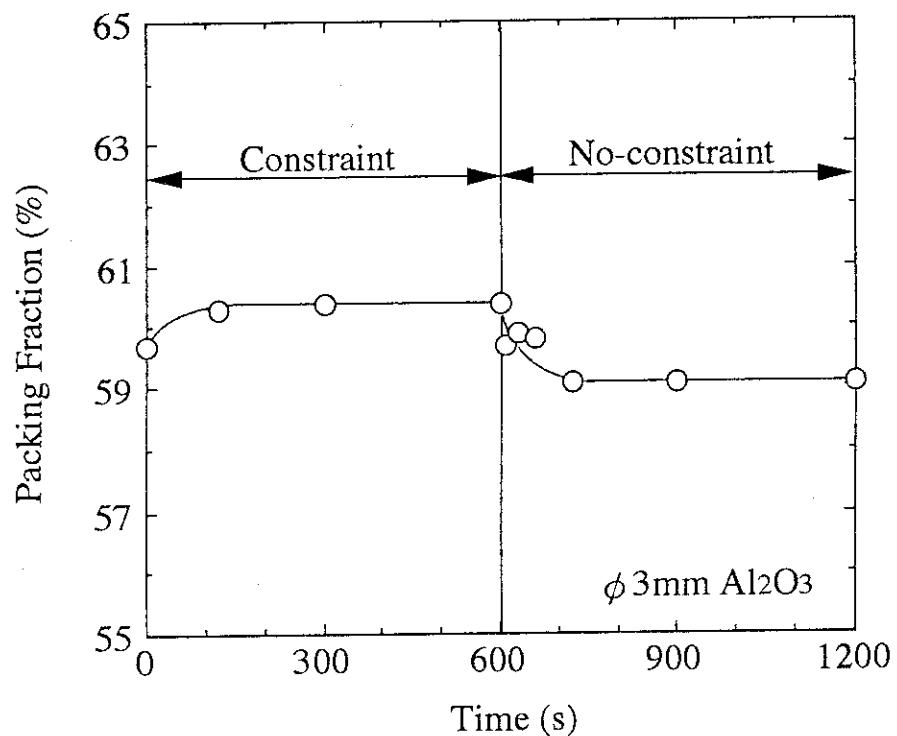


Fig. 11 The packing fraction of $\phi 3\text{mm}$ Al_2O_3 pebbles vibrated under constraint and no-constraint

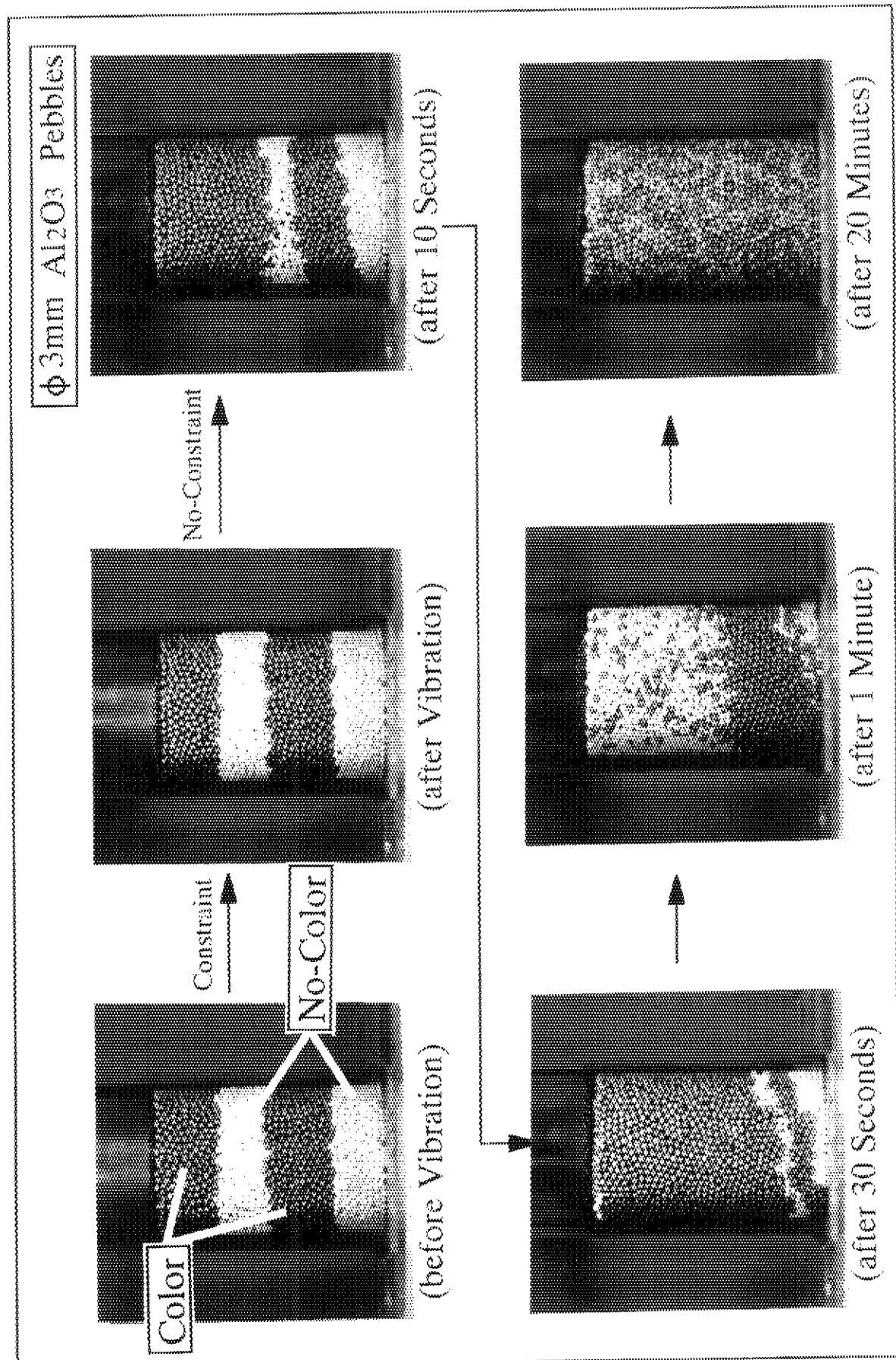


Fig. 12. Vibration packing characteristics of one-component pebbles

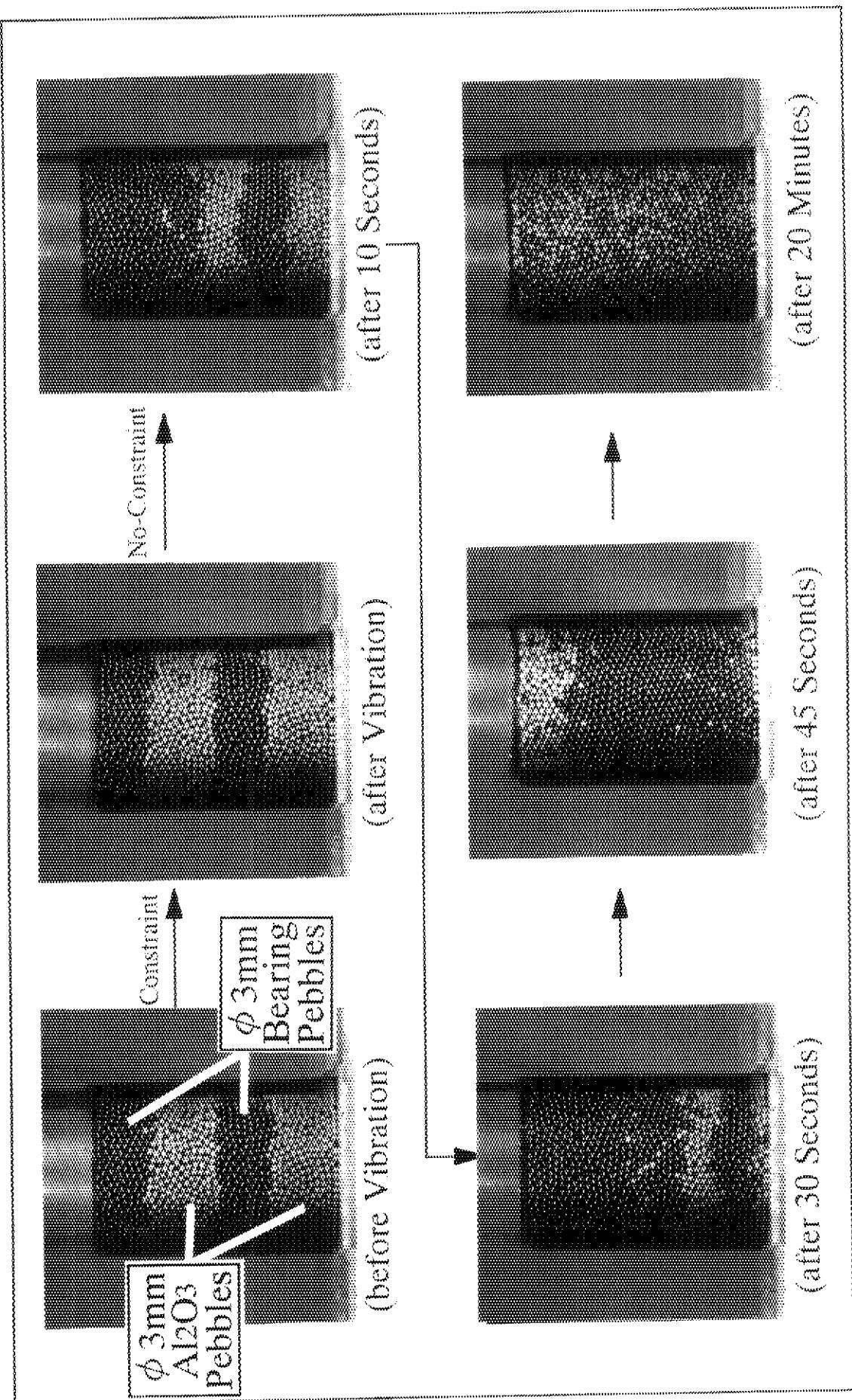


FIG. 13 Vibration packing characteristics of two-component pebbles

P.F. : Packing Fraction

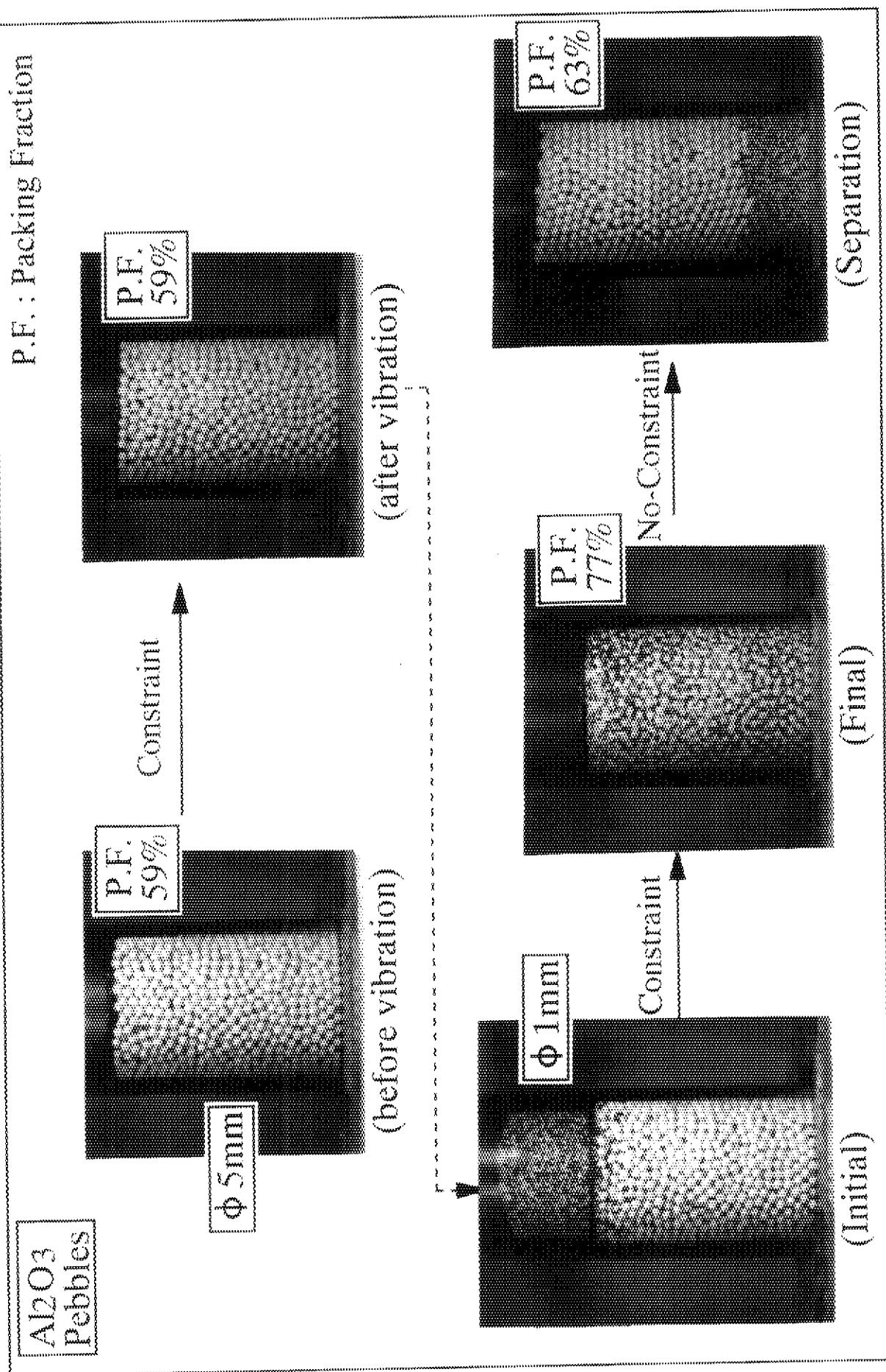


Fig. 14 Vibration packing characteristics of two-size pebbles

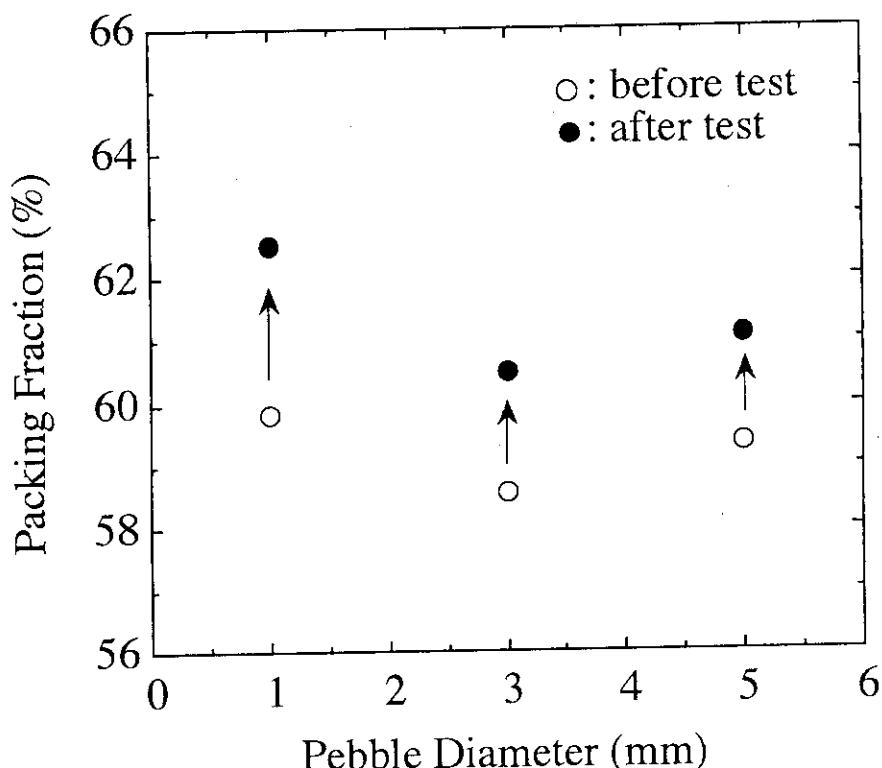


Fig. 15 Relation between the packing fraction and $\phi 1\text{mm}$ Al_2O_3 , $\phi 3\text{mm}$ Al_2O_3 and $\phi 5\text{mm}$ Al_2O_3 pebbles before thermal cycle and after thermal cycle

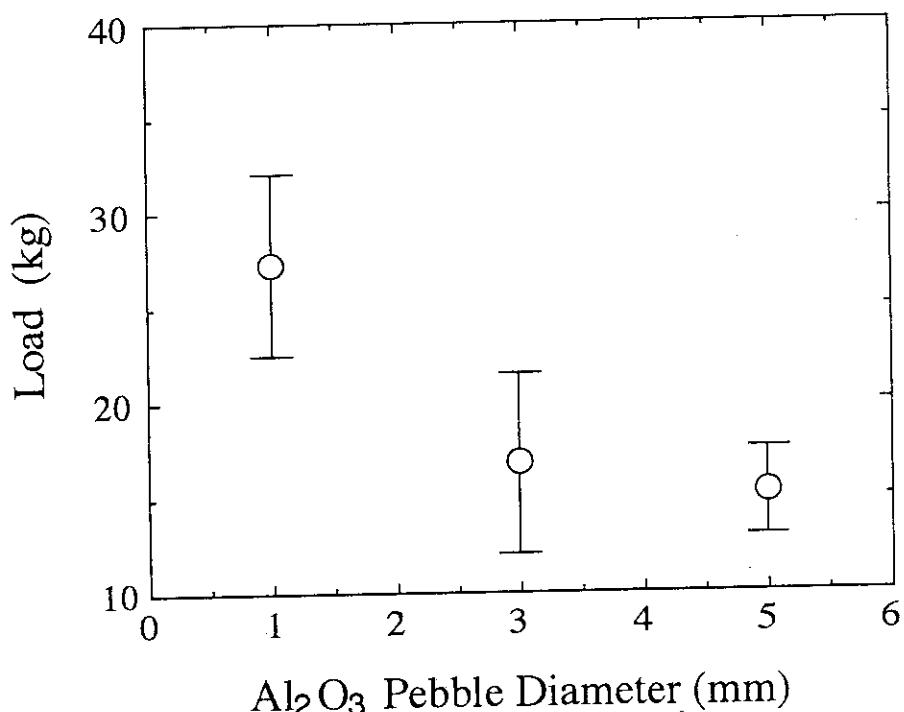


Fig. 16 Relation between load and $\phi 1\text{mm}$ Al_2O_3 , $\phi 3\text{mm}$ Al_2O_3 and $\phi 5\text{mm}$ Al_2O_3 pebbles after thermal cycle

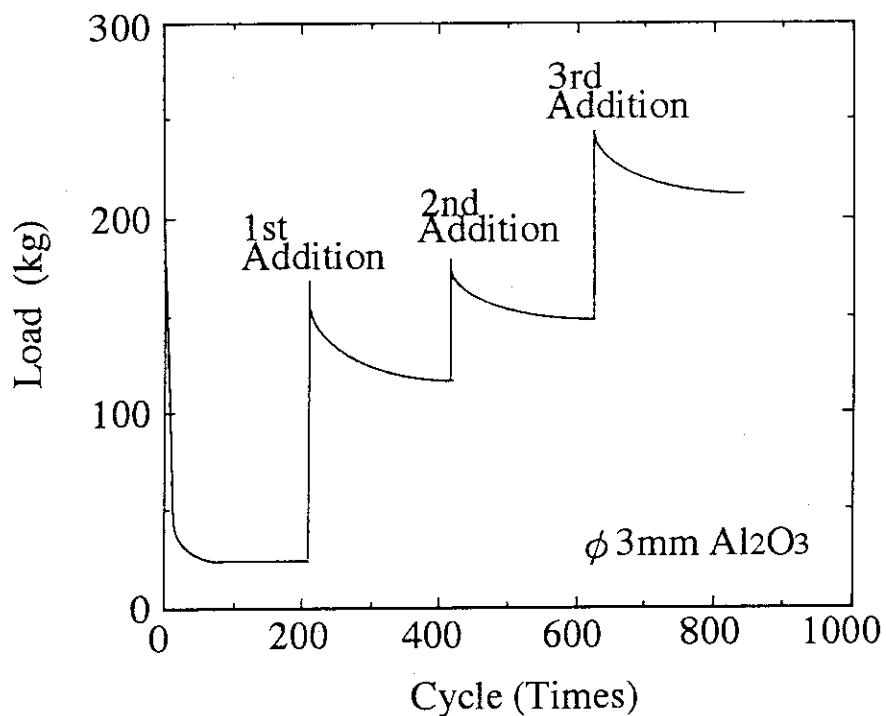


Fig. 17 Load on $\phi 3\text{mm Al}_2\text{O}_3$ pebbles additional packing under thermal cycle

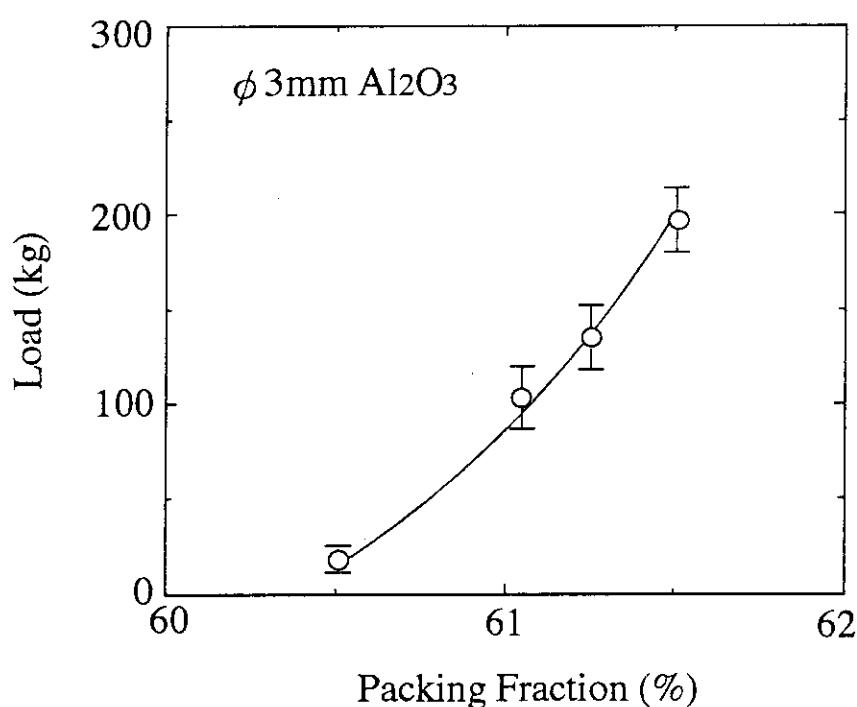


Fig. 18 Relation between the packing fraction and load on $\phi 3\text{mm Al}_2\text{O}_3$ pebbles additional packing after thermal cycle