

# 放射性追跡法による摩耗試験

加藤 正 夫

およそモノが動けば摩耗という現象が必ず伴う。この現象を正しく観察し解析することによって、これを防ぎ、または減らすことも可能となる。このことは工業技術の分野でとくに重要な課題である。アイソトープはこの研究に最も有力な手段と考えられている。その使いかたと応用例について略述する。

## 1. ま え が き

摩耗試験に放射性同位元素（以下 RI と略称する）を利用することはきわめて有利である。その理由は、摩耗量の測定感度の高いこと、実験過程を中止または破壊することなく連続測定が可能なこと、従来の 1/10 ないし 1/100 という短い時間で試験ができ、かつ計測も容易であること、ラジオオートグラフィの利用によって移行物質の分布を定量的にまた非常に高感度で記録できること、さらにガソリンや潤滑油の性能をも同時に評価できること、などである。

1944 年に発表された B.W. Sackman<sup>1)</sup>らの研究がこの方法を用いた最初のものといえよう。その後原子力技術一般の進歩に伴いこの技術も改善され、かつ広く普及されるに至っている。この方法の要点は、試料にその表面の物理・化学的条件を変えることなく放射能を付与すること、高い感度と精度の計測を行なうこと、放射線の遮蔽ないし汚染防止の処置、などである。

## 2. 放射性試料の作製

一般につぎのような方法で行なわれる。

(1) はじめから試料の主要成分元素と同じ元素の RI を用いて、全体に RI が均一に分散するように作り上げる。この方法の欠点は、たとえば放射性のピストン・リングの試料を作る場合を考えてみるとよくわかる。ピストン・リングは最初にある大きさの鋳物を鋳造して、この鋳物を小さく切断しさらに削り出してはじめて 1 個の製品ができ上がる。したがって必要量の何十倍かの RI を取り扱うことになり実施がむずかしくかつ不経済である。

(2) したがって摩耗面だけに局部的に標識を付ける（放射能を付与すること）方法がしばしば行なわれる。試料が金属である場合にはメッキの方法によるか、鋳物であれば鋳造の工程で RI をふくむ溶湯をその部分に導入するか、または RI を含む等しい材質の小さい試料を別に作っておいて摩擦面に埋め込む、などの方法による。しかしこの方法も実際の条件を完全に作り出すわけ

にゆかない難点がある。

(3) 試料を原子炉に入れて放射化する。この方法は最初アメリカの California Research Corp. で考案したものである。今日では特別の場合を除いてはほとんどの方法で試料に標識を付けている。しかし難点はもちろんある。すなわち試料の形状が大きくなると原子炉に装入できなくなる、標識したい成分元素の放射化断面積が非常に小さいか、または生成した RI の半減期が使えないほど短い、主成分以外の RI もたくさん生成するなどである。第 1 項に対しては原子炉を大きくする以外に方法はない。第 2 項に対しては、主成分金属に完全に固溶しかつ表面の条件を変えさせない元素をさがし、そのなかで放射化断面積が大きかつ生成 RI の寿命が適当なもの（このような元素または化合物をコンタミネントと称する）を選んで、なるべく少量を添加しておくことである。たとえば、アルミニウムに対しては金を、鉄に対しては白金がよい。第 3 項に対しては、RI が雑多に混在してもその混合放射能を計測することで差し支えない場合が多いが、不都合ならば  $\gamma$  線スペクトロメータで著目する RI だけを追跡することが可能である。

以上に述べたように、いずれの方法も一長一短があり、目的に応じて最も適した方法を選び、かつ種々の工夫を加える必要がある。一般的に注意しなければならないことは、摩耗面の放射能の分布が均一であり、かつ必要厚さをもっていなければならない。そうでなければ放射能によって摩耗量が代表されないことになるからである。また必要な精度に応じた比放射能 (mc/mg) を与えておかなければならない。これらのことがらを著者らの行なったピストン・リングの標識法の実験を引用して説明してみる<sup>2,3)</sup>。

ローソン・エンジンのピストン・リング（重量約 9.5 g）3 本を標準純鉄片とともにアルミニウム板で外装し、JRR-1 の No. 15 垂直実験孔に 25 日間入れておき、この間正味 66 時間、 $1 \sim 1.5 \times 10^9$  n/cm<sup>2</sup>·sec の中性子束で照射を行なった。（JRR-1 は連続運転のできない炉である）ピストン・リングの組成（重量%）はつぎのとおりであった。

第 1 表 熱中性子照射によってピストン・リング中に生成する放射能の計算値

| 元素 | ピストンリング中の含有量 (wt%) | 核 反 応                                     | 存在比 (%) | 放射化断面積 (バーン) | RI の半減期 | 生 成 量※ (計算値) (μC/g)    |
|----|--------------------|---|---------|--------------|---------|------------------------|
| Fe | 92.5               | $^{54}\text{Fe}(n, \gamma)^{55}\text{Fe}$ | 5.84    | 2.2          | 3.0 年   | $^{55}\text{Fe}: 0.70$ |
|    |                    | $^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}$ | 0.31    | 0.9          | 45.1 日  | $^{59}\text{Fe}: 0.16$ |
| P  | 0.5                | $^{31}\text{P}(n, \gamma)^{32}\text{P}$   | 100     | 0.23         | 14.3 日  | $^{32}\text{P}: 5.67$  |

※ ピストン・リング 1g 当たりの放射能の強さ

Fe C Si Mn P Cu Cr S Ni Co

92.5 3.85 2.60 1.00 0.5 0.1 0.05 少量含む

この条件で、つぎの放射化反応の式を用いて、Fe と P に着目して計算を行ない第 1 表の結果を得た。

$$At = f\sigma No(1 - e^{-0.693t/T})e^{-0.693d/T}$$

ここに、

f: 熱中性子束 ( $= 1 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ )

No: 着目する同位体がリングの 1g 中に含まれる原子数

σ: 着目する同位体の放射化断面積 (バーン)

t: 照射時間 (sec)

d: 減衰時間 (sec)

T: (n, γ) 反応によって生成した RI の半減期 (sec)

At: 当該 RI による放射能の強さ (μC)

一方実験によって得られた β 計数による減衰曲線・吸収曲線・γ 線スペクトルの結果は、いずれも計算値とよい一致がみられた。このように、比較的エネルギーの大きな β 線のための放射体である  $^{32}\text{P}$  の放射能が卓越しているが、鑄鉄の結晶粒界に偏析して存在するので不安定であり、 $^{32}\text{P}$  を追跡体を選ぶことは好ましくはない。また  $^{55}\text{Fe}$  はエネルギーの低い X 線だけを放射するので計数値にはあまり寄与しない。結局  $^{55}\text{Fe}$  を追跡体を選び、しかもその γ 線だけを計数することが、摩耗実験を正しく行なうために、好ましいことである。このような計測には Al 吸収板で β 線を切り、NaI シンチレーション・カウンタで  $^{55}\text{Fe}$  の γ 線 (この場合わずかに存在する

$^{60}\text{Co}$ ,  $^{51}\text{Cr}$  の γ 線も混じることになるが、Co や Cr はフェライトの中に固溶しているのであるから差し支えない) を計測するのがよい。しかしこの比放射能では摩粉 1mg 当たりわずか 10cpm 程度の応答しか得られないことにより、事実摩耗

実験を試みたのであるが、そのとおり感度が不十分で一応の摩耗曲線を得たが信頼できる結果とはいえず、JRR-2 が使えるようになるまで見送らざるを得ないことになった。外国の例では実験室でのエンジン摩耗実験の場合でも  $100 \mu\text{C} \cdot ^{59}\text{Fe/g}$  以上であり、実車実験では  $3 \text{ mC} \cdot ^{59}\text{Fe/g}$  の放射性リングを使用していることが報告されている。前者の場合でも熱中性子束  $10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  で連続 10 日間の照射を必要とする。なお原子炉で放射化したリングの放射能の均一性は写真 1 にみるように非常に良好であって、これは中性子照射の特徴である。

当時の日本の事情から推して、当分原子炉が使えないとなるとサイクロトロンによる重水素核衝撃による放射化も検討する必要を感じて実験を行なった。京都大学化学研究所の 15 MeV サイクロトロンでの衝撃を依頼し、 $7.6 \mu\text{A} \cdot \text{hr}$  のビーム電流で 30 分間衝撃した。リングの化学組成は前述のとおりであるが、重水素核の衝撃では Fe に基因する数種の γ 線放射体が生成し得るのであ

第 2 表 γ 線スペクトルとエネルギーの対応

| RI<br>スペク<br>トル MeV | 生成 RI の γ 線エネルギー MeV       |                             |                            |                            |                           |                             |
|---------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
|                     | $^{54}\text{Mn}$           | $^{56}\text{Co}$            | $^{57}\text{Co}$           | $^{58}\text{Co}$           | $^{32}\text{P}$           | $^{55}\text{Fe}$            |
| 0.12                | —                          | —                           | 0.119                      | —                          | —                         | —                           |
| 0.20                | —                          | —                           | —                          | —                          | —                         | 0.21                        |
| 0.84                | 0.84                       | 0.845                       | —                          | 0.81                       | —                         | —                           |
| 1.23                | —                          | 1.26                        | —                          | —                          | —                         | —                           |
| 1.72                | —                          | 1.74                        | —                          | —                          | β-1.70                    | —                           |
| 核 反 応               | $^{56}\text{Fe}$<br>(d, α) | $^{56}\text{Fe}$<br>(d, 2n) | $^{56}\text{Fe}$<br>(d, n) | $^{57}\text{Fe}$<br>(d, n) | $^{31}\text{P}$<br>(d, p) | $^{55}\text{Mn}$<br>(d, 2n) |
| 半 減 期               | 324 d                      | 80 d                        | 270 d                      | 72 d                       | 14.3 d                    | 3.0 y                       |

て、それを第 2 表に示しておく。γ 線スペクトルをとり、これらの生成を確認すると同時に、この  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Ce}$  が主なものであり、また  $^{32}\text{P}$  も (d, p) 反応によりかなりできることもわかった。一方重水素核は物質中の透過能が小さく、その鉄中の飛程を実験式<sup>4)</sup> から算出すると  $316 \mu$  となる。実際にリングの表面を塩酸溶液に溶解して、その放射能分布をしらべた結果が第 1 図であって、表面から  $120 \mu$  ぐらまでは急激に減少し、最大約  $280 \mu$  まで達しており、計算値に近い結果が得られた。原子核乳剤を用いたラジオオートグラフもこの放射化層を示している。それではこの方法が摩耗実験に実用可能かということ、放射能の強さの点からは JRR-1 で中性子

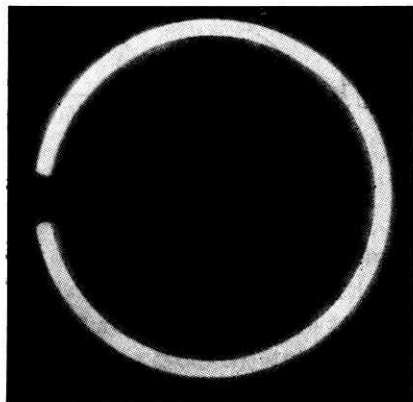
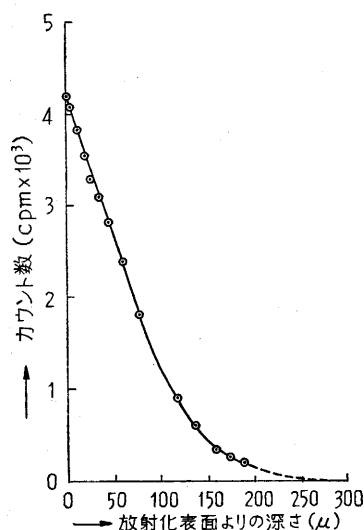


写真 1 JRR-1 で放射化したピストン・リングのオートラジオグラフ



第1図 放射化層の厚さの決定

照射したものより大きく、その勾配の難点については同じリングを同時に衝撃して摩耗量—放射能の検量曲線を作っておくことによって解決できる。結論としてこの方法でも高い精度は得られないにしても実用可能といえよう。この後者に付随することがらとして、深さによる放射性核種の生成の相違がある。 $^{56}\text{Fe}(d, 2n)^{56}\text{Co}$ の反応は $^{56}\text{Fe}(d, n)^{57}\text{Co}$ の反応より重水素核のエネルギーの高いところでおこなない。したがって、 $^{56}\text{Co}$ と $^{57}\text{Co}$ は均一に分布しないで、 $^{56}\text{Co}$ のほうは外側に、 $^{57}\text{Co}$ は内側に片寄った分布となると考えられる。かつ $^{56}\text{Co}$ は種々のエネルギーの $\gamma$ 線を出す $^{57}\text{Co}$ は低いエネルギーのものしか出さないから計数効率が悪く、これが放射能勾配を助長しているともいえる。この放射能勾配に対しては加熱拡散法によって、均質化することも可能な場合がある。ただしピストン・リングの場合には材質を変えることになるから不都合である。

### 3. 基礎研究への応用

最初に RI を用いた場合の測定感度について説明しておく。比放射能  $S$  mc/g, 計数率  $Y\%$ , 測定に必要な最低の計数率  $n$  cpm とすれば、その元素の測定限度  $x$  g は次の式から計算できる。

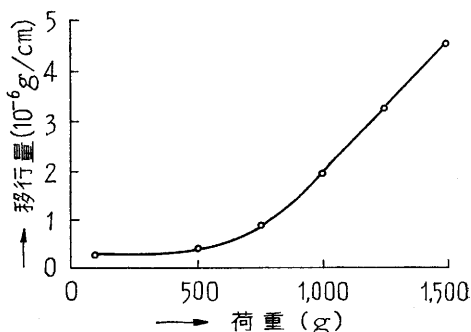
$$x = n / 2.2 \times 10^9 \times (Y/100) \times S$$

これからわかるように、被試験体の比放射能を大きくすればそれだけ測定感度を上げることができる。計数率は計測器の性能と測定のジオメトリによって決まる。定量測定に必要な計数率は自然計数率と同じオーダー以上であることが望ましい。また $\beta$ 計数には GM 計数管を、 $\gamma$ 計数にはシンチレータを用いるのが常法である。いま被試験体の比放射能を 1 mc/g とすれば、 $Y$  と  $n$  のとりかたによって変わるが、 $\gamma$ 計数の場合の感度は 1  $\mu$ g の程度で、 $\beta$ 計数ではこれより 1 桁高くなる、という目安でいたい差し支えない。もちろん比放射能と計測条件が変わればこの値もそれだけ変わることになる。

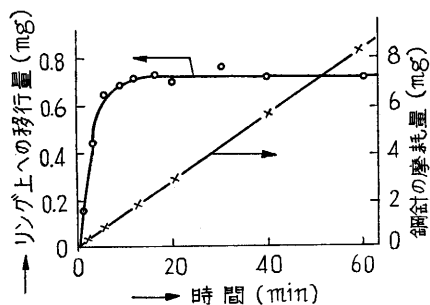
また $\beta$ 線用原子核乳剤を用いたラジオオートグラフィを適用すれば、 $10^{-12}$  g までの検出も可能となり、移行

した物質の分布の模様を永久的に視覚的に記録することができる。

RI を応用した初期の摩耗の研究では、前述の Sackman につづいて J. N. Gregory<sup>5)</sup> の研究が有名である。RaD で標識した鉛の滑子を銅・銅・鉛の上で摩擦し、凝着が起これば必ず物質の移行が行なわれることを結論し、摩擦面の条痕をラジオオートグラフに写しとり、凝着ととりとが交互に起きていることを明らかにし、F. P. Bowden らの提唱したスチック・スリップ機構の実在を証明した。また潤滑剤は凝着を極度に低下させて

第2図 銅と銅との摩擦における移行量 (J. K. Lancaster) 電解研磨した面の摩擦係数  $\mu=1.0$ , 走行速度 1 cm/min, 走行距離 2 cm

いることも同時に示した。類似の研究は J. T. Burwell, E. Rabinowicz, J. K. Lancaster などの人々によって行なわれている。いずれも単体の金属を原子炉で ( $n, \gamma$ ) 反応 (この場合はターゲット元素の原子番号は変わらないのが特徴である) によって比放射能を高め、また測定方法を改善して感度と精度とを高める努力が認められる。



第3図 鋼針の摩耗とそのリング面への移行との関係 (荷重 1,000 g)

M. Kerridge<sup>6)</sup> は摩耗粉の生成過程を知るため、原子炉で放射化した鋼針を回転する超硬材料のリング面に押し当てて摩耗させ、リング面に移行した摩耗量は放射能で定量し、鋼針の摩耗量はその長さの変化を顕微鏡でしらべて、時間的变化を測定した。第2図からわかるように、はじめ鋼針の摩耗量はリング面に移行するが、やがて一部摩耗粉として脱落し、両者が平衡することがわか

る。さらに真空中での実験との比較から、摩耗粉は金属の移行、移行金属の酸化、酸化物の脱落の3段階を経て生ずることを明らかにした。

#### 4. 応用研究

応用研究には非常に広い範囲にわたって RI が応用されている。たとえば、切削加工用工具、塑性加工用ダイス・パンチ、歯車と軸受、内燃機関用ピストンリング・シリンダ、リレー接触片、さらに自動車のタイヤ、道路舗装材、床板・スキー用ワックスなどの摩耗の研究がある。また摩擦面の潤滑に関して、潤滑材の性能評価や潤滑機構の研究、添加剤と金属との反応機構の研究などに放射性追跡技術がますます活用されている。

以下にこれらのうち代表的な研究を例に挙げ、順を追って説明してみよう。

##### (1) 切削工具に関する研究

B. Colding<sup>7)</sup> らはタングステン・カーバイドの刃先を原子炉で放射化し、約 10mc/g の比放射能を与えて工具摩耗の研究を行なった。生成 RI の主なものは  $^{187}\text{W}$  (半減期 24 hr) である。被削物への工具材の移行状況をオートラジオグラフに撮って検討するとともに工具のすくい面と逃げ面との摩耗をしらべ、切削速度と工具寿命との関係をしらべた。これらの間には直線関係が成立することを示した。同様な研究は佐田<sup>8)</sup> によっても行なわれ、同様な結果を得ている。その結果から、定常状態になったときの工具摩耗の進行速度が得られれば、その進行速度の逆数をもって工具寿命の目安が立てられ、しかも切削開始後間もなく摩耗の進行速度が定常状態になるので、この方法によればごく短時間のうちに工具寿命が判定できるとしている。また被削材料に関しては、炭素鋼では炭素量の多くなるほど、また熱処理した Cr-Mo 鋼では硬度の高いものほど工具寿命が短くなるなどの結果を得ている。

##### (2) 塑性加工用ダイスに関する研究

J. C. E. Button<sup>9)</sup> らは、タングステン・カーバイド系の線引用ダイスを原子炉で放射化したものを用い、潤滑油の減摩能を評価する実験を行なった。この場合ダイス中の生成 RI は  $^{187}\text{W}$  のほか  $^{60}\text{Co}$  も存在しているので、その放射能特性の差異を利用してこれら成分による引抜鋼線への移行過程もしらべた。またダイスの摩耗量は放射能計測により引抜線 1 インチについて約  $10^{-9}\text{g}$  程度とわかったが、その孔径変化から計算した値とよく一致した。またドイツの W. Dahl<sup>10)</sup> らも線引用ダイスについて、鋼線を引き抜いて同様な実験を行なっている。

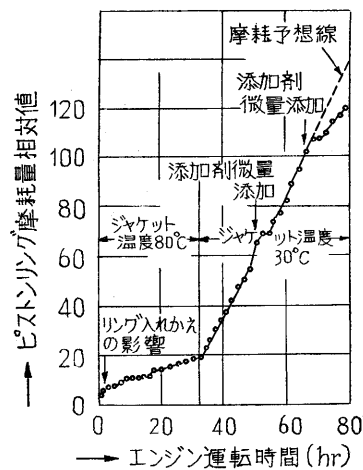
##### (3) エンジン摩耗に関する研究

エンジン摩耗とはピストン・リングとシリンダの摩耗を実際のエンジンを運転して、燃料および潤滑剤の性質

あるいは運転条件の影響などに関して、試験するのである。この試験は燃料・潤滑油の品質の改良だけでなくエンジンそのものの改良に役立つ。放射性追跡法をこれに応用すると、従来の方法で 500 時間要した実験を約 3 時間で約 200 マイルの走行に相当する結果が得られるという。

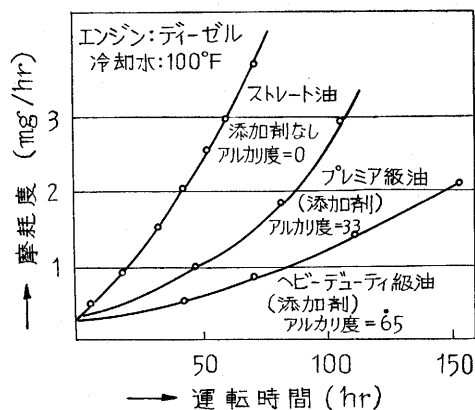
この試験の方法は、ピストン・リングの摩耗とともに放射性の摩耗粉が潤滑油の循環系にはいつてくるから、この途中に放射能測定装置を組み込んで連続測定を行ない、摩耗量を計量するのである。この場合、放射線計測器のプロブ（またはヘッドともいう）の挿入部はパイプの径を大きくして流速を落とし、他の部分からの放射能の影響を遮断するために厚い鉛壁で囲うことが必要である。また油層を通して放射線を測るのであるから、透過能の小さい  $\beta$  線はまったく役に立たないのであって、 $\gamma$  線計測によらなければならないのである。

この方法で得られた二三の試験結果を以下に述べてみよう。A. Dyson ら<sup>11)</sup> はジャケット温度や耐摩耗添加

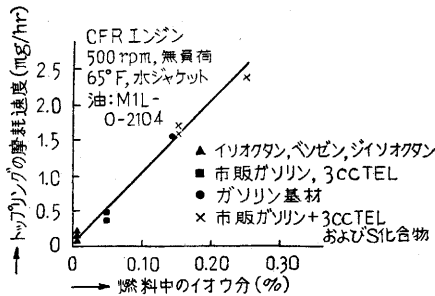


第4図 a. ジャケット温度の影響, b. 耐摩耗添加剤添加の影響, c. リング入れかえの影響, などを示す。

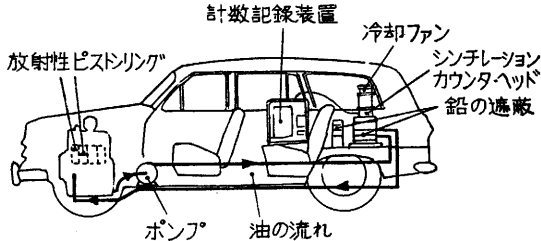
の添加などの影響をしらべ第4図に示すような結果を得た。すなわちジャケットの温度を下げると摩耗速度が増し、これに用いた添加剤の効果はわずかであった。また、潤滑油の性能によって摩耗量が異なってくることを示した H. V. Nutt ら<sup>12)</sup> の試験を第5図に、ガソリン中のトオウ分のピスト



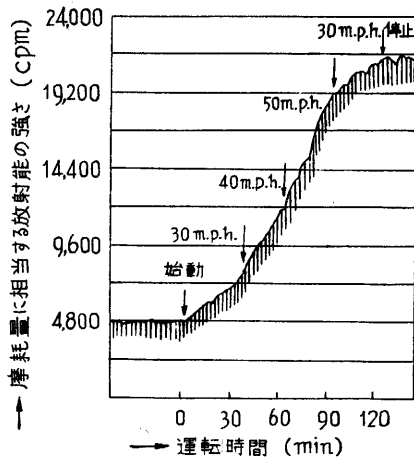
第5図 潤滑油の種類と摩耗度



第6図 ガソリンエンジンの低温摩耗に対する燃料中のイオウの影響



第7図 試験車内部の試験装置の配置



第8図 ピストン・リングの摩耗に及ぼす速度の影響

ン・リングの摩耗速度に及ぼす影響を試験した H. R. Jackson ら<sup>13)</sup>の結果を第6図に示す。しかし、実験室用エンジンによる評価実験は、その運転条件が道路を走る自動車のエンジンの条件とくらべて低温における腐食摩耗やじんあい(塵埃)による“ひっかき摩耗”の生起など

の点でかなり異なる点がみられ、したがって最も実際に近い評価には実車を動かしてみ、その摩耗の起こり方を検討することが必要となってくる。このような試みはすでに欧米の自動車会社で行なっているが、J. H. Deterding<sup>14)</sup>らが行なった実験をここに紹介しておく。第7図は実験車内部の試験装置の配置を示し、第8図にその試験結果の1例を示した。すなわち自動車の速度と摩耗との関係は、速度を 30 mph から 40 mph に上げると摩耗度は2倍に、さらに 50 mph まで上げると3倍に増えることがわかる。また始動時などエンジンが低温のときは腐食摩耗ははげしくおこるが、ウォームアップされれば摩耗度は減少すること、耐摩耗性添加剤の添加により、腐食摩耗は明らかに減少することを確認している。

## 5. あとがき

なおその他多くの応用研究に放射性追跡法が応用され、従来の方法ではよくわからなかった現象を捕捉し、またその機構を解明した多くの研究が報告されているが、紙面も尽きたのでここで擱筆する。

(1961年7月25日受理)

## 文 献

- 1) B. W. Sackman, J. T. Burwell, J. W. Irvine: J. Appl. Phys., **15**, 495 (1944).
- 2) 加藤・津田野・高井・梅原: 第3回日本アイソトープ会議報文集, T16, 130 (1959).
- 3) 加藤・津田野・高井・梅原: 第2回日本アイソトープ会議報文集, T16, 88 (1958).
- 4) G. Friedlander; J. W. Kennedy: "Nuclear and Radiochemistry", 190, (1955), Wiley & Sons.
- 5) J. N. Gregory: Nature, **157**, 443 (1946).
- 6) M. Kerridge: Proc. Phys. Soc., **68**, 400 (1955).
- 7) B. Colding, et al: Nucleonics, **11** [2], 46 (1953).
- 8) 佐田登志夫, 他: 第3回日本アイソトープ会議報文集, T-10, 127 (1959).
- 9) J. C. E. Button, et al: Nucleonics, **9**, 5, 34 (1951).
- 10) W. Dahl, et al: Stahl u. Eisen, **76**, 257 (1956).
- 11) A. Dyson, et al: J. Inst. Petroleum, **39**, 524 (1953).
- 12) H. V. Nutt, et al: SAE J., **63** [4], 64 (1955).
- 13) H. R. Jackson, et al: SAE Quart. Trans., **6**, 519 (1952).
- 14) J. H. Deterding, et al: Proc. of 2nd Geneva Conf., Vol. 19, 141 (1958).

## 正 誤 表 (7月号)

| 頁  | 段 | 行    | 種 別 | 正   | 誤   |
|----|---|------|-----|---|---|
| 10 | 右 | 1    | 本 文 | $= \frac{\chi_{eff}}{\mu_0} \cdot \frac{\mu_0 h \cdot h^*}{4 W} \cdot \delta V$ | $= \frac{\chi_{eff}}{\mu_0} \cdot \frac{\mu_0 h \cdot h^*}{4 W} \delta \cdot V$ |
| 14 | 左 | 下より1 | "   | VHF   | UHF   |