Some Electrochemical Problems in Irradiated Fields

Hiroshi Okashita

Analytical Chemistry Group, Chemistry Division,
Japan Atomic Energy Research Institute

近年原子力の開発にともなつて放射線を取扱う分野が非常に多くなつて来た。放射線のために物質や反応の物理的・化学的諸性質が影響を受けてくるので、この方面の研究もますます必要となつて来ている。ここに記す解説は放射線が特に電気化学の分野に示す影響について総説的に述べたものである。本稿では省略したが、金属の腐食、電気材量の絶縁性、高分子の電気的変化など広い意味での電気化学の分野に、放射線によつて起るいくつかの現象がみられる。

本文は強放射線下の電気化学的現象と実験装置に二別して記した。以下順を追つて述べる。

1. 電気化学的現象

放射線のために起る電気化学的変化は放射線が直接に電極または電極界面物質に作用して起る場合と、溶液中で放射線化学反応が起つたために間接的に生ずる場合が考えられるであろう。この間接作用では、一次放射線分解生成物は酸化力または還元力を持つ場合が多いのでこれが電極に作用して起す諸変化から放射線分解生成物や系の変化を電気化学的に捉えることも可能である。

電気化学的測定では、その性質上多くの場合強電解質溶液を用いる。この溶媒が水、有機溶媒、融解塩のいずれを用いる場合にも、上記の間接作用が問題となつてくる。

1.1 水の分解

水は放射線を受けるといろいろな中間段階を経て、水素、酸素、過酸化水素に分解するが、その機構についてはいくつかの説があつて完全に解明された状態ではない。水の γ 線による分解は次式のように、

強放射線下における電気 化学的諸問題

岡 下 宏

日本原子力研究所化学部分析化学研究室

の二つに分けて考えることができる。それぞれの生成定数は $K_1=0.46\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{H}_2/100\text{ev}$, $K_2=2.74\text{H}$, $\text{OH}/100\text{ev}$ であり、水の分解の最小値は $3.66\text{H}_2\text{O}/100\text{ev}$ であると報告されている¹⁾¹⁵⁾。

電解液の pH や酸素含有量は Voltammetry で問題になる因子であるが、放射線を受けて過酸化水素を作る反応でもこれが非常に影響している。第1図は酸素を含まない臭化カリウム溶

minute irradiation (intensity, $2.42 \times 10^{20} \text{eV/l} \cdot \text{min}$)

Fig. 1 Effect of pH on initial H_2O_2 Production in oxygen-free KBr solns. irradiated with cobalt gamma rays.

液の pH を変えて吸収エネルギーと過酸化水素生成分子数の関係を示したものである。図から明らかなように酸性度が増加すると過酸化水素生成率も高くなっている。中性の溶液が照射を受ける場合は、過酸化水素が速やかに酸素と水に分解するため見掛けの生成率は低い。

また第 2 図は同じ溶液に酸素または水素ガスを吹きこんで照射した際の過酸化水素生成量と吸収エネルギーの関係である。水素だけを吹き

Fig. 2 The initial production of H₂O₂ in Solution containing either oxygen, hydrogen or both gases.

こんだ場合、過酸化水素は生成しない。酸素を吹きこんで過酸化水素生成量が増加するのは当然であるが、酸素と水素を同時に吹きこんだ場合よりも生成量がさらに高くなる。電気化学的測定の際、脱酸素を水素で行うときは十分時間をかけなければならないことがわかる。

有機溶媒の場合も水と同じ問題がある。Teply ら³⁶⁾はクロロホルム水溶液を照射してクロロホルムが分解する過程の実験を報告しているが、照射を続けるに従って塩酸の濃度がほぼ比

例的に増加し 10¹⁴ eV/ml.min の線量率で 20 時間照射すると電気伝導度が 10 倍になることを示している。他の有機物も同様に放射線を受ける。結合の切断および再結合が起こり、この現象を電気化学的に追求する領域は非常に広く残っているのであるが、有機物を支持塩としたり、溶媒としてのみ使用するときは難解な問題が多く起ることを覚悟しなければならない。無機物の放射線化学反応については Vesolovsky³⁹⁾が第一回ジュネーブ会議で報告している。

さて、照射の結果溶液中に酸化還元性物質ができると、すでに述べたようにその系の電気化学的変数、特に電極電位に変化を与える。そしてこの電極電位の変化はその系の熱力学的変化および電極での放射線分解生成物反応速度の目安でもある。このことは電極反応の機構とか速度論の考え方、殊に Frumkin⁴⁰⁾の電極-溶液界面の構造と電極反応速度論の相互依存性に関する論文からも伺い知れる。

そこで、水溶液中で照射を受けた場合の電気化学的影響の研究は、とりもなおさずこの系中での放射線化学反応の機構を研究する有効な方法なのである。

定性的に述べると、照射によって生じた酸化性物質および還元性物質の電極電位への寄与は、ちょうどこれらの物質を電気化学的に逆に合成する際の自由エネルギーに対応するはずである。つまり、

$$(E_{OH} - E_H) F = \Delta F$$

ここで E_{OH} , E_H はそれぞれの放射線分解生成物の平衡電極電位、 F はファラデー定数、 ΔF は水素基に水酸基から水を生成するときの自由エネルギーである。実際の水溶液中での電極電位 E_{OH} , E_H は与えられた電流密度でそれぞれの電極に酸素分子および水素分子を発生する電位以上にはならない。

1・2 還元性分解生成物

Vesolovsky ら³⁸⁾は放射線の電気化学的作用に関するいくつかの事実を発見している。

硫酸溶液中の白金電極を 100 キュリーのコバルトで照射すると (吸収エネルギー 2.0×10^{15} eV/cm²·sec) 可逆水素電位に等しい安定な電位

が得られ、この電極は $20 \sim 30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ までの陽極分極電流を永続的に流す。この電流値は実験条件下で還元性放射線分解生成物の拡散速度の尺度となるものである。

Fig. 3 Dependence of Pt electrode potential on the time of gamma radiation action (I and II) and on the time of charging the electrode with $10 \mu\text{A}$ current (III).

第3図は白金電極電位と照射時間との関係を示したものである。Curve I は実験前に電極を空気に接触させておいたもの、Curve II は実験前に電極を還元しておいたものである。これらの結果から照射を受けてゆくと白金陽極電位は負の電位に移り、照射開始後15~20分には水素電極電位と一致することがわかる。

この Curve は白金電極に電流を流したときにみられる Curve (第3図の Curve III) と類似しており、電極における酸素の還元と水素の吸着の特徴をも備えている。等量の酸化性放射線分解生成物 (OH , H_2O_2 , O_2) の共存下では水素分子は水素電位に顕著な影響を示し得ないので、電位の変化に関係する物質は水の一次放射線分解反応で生じて白金電極に選択的に吸着される水素原子であろう。モデル化すると次のようになる。

電極反応を複雑にするような過程は何も起らないとすると水素の電気化学的酸化は次式で示

される。

$$i = k(\text{H})e^{\frac{a \cdot F\phi}{RT}}$$

この式から分極電流 (水素原子のイオン化速度) は、水素原子の界面濃度 $[\text{H}]$ に比例し、平衡値からの電極電位の差 ϕ に指数的に関係する。さらに電極に水素原子が吸着するときほとんど活性化エネルギーを要しないと仮定すれば、低度の過電圧状態下では電極での分極電流値は水素原子が電極へ拡散してゆく量によって定まるはずである。

Fig. 4 Dependence of the strength of the polarizing current during the action of gamma radiations.

反応の速度論的実験から、この反応は実際に還元性因子 (水素原子) の作用電極への拡散により律速されることが確認された。第4図は分極電流と電極電位との関係を示したものである。図からわかることは、この過程の活性化エネルギーが低いこと (最初の立ち上がりが急である) および拡散律速 (電流は電極電位に無関係) ということである。

第5図は陽極ポーラログラフィーで行った水素イオン化反応の定量実験結果である (白金電極・表面積 0.37cm^2)。一定拡散電流はこの実験条件下で照射開始後 2.5~3 分後に得られた (第6図)。

第5図の下の方の Curve は静止電極、上の Curve は回転電極によるものである。この図でみ

Fig. 5 Dependence of the strength of the polarizing current on the potential during the action of gamma radiations : 1) Stationary electrode : 2) rotating electrode.

Fig. 6 Dependence of the strength of the polarizing current on the time of gamma radiation action, when the constant potential of the electrode is $V=0.4V$.

ると、電極電位が $0.2 \sim 0.3V$ になると拡散限界電流が増加している。これはおそらく溶液から拡散してくる二つの物質——水素原子と水素分子の電気化学的作用の差によるものである

う。

さらに興味あることは、硫酸溶液にシュウ酸を加えると回転白金陽極電流が $20 \sim 30 \mu A/cm^2$ から $150 \sim 200 \mu A/cm^2$ に急増することである。電極電位の方は平衡水素電位とほとんど等しくなるだけである。

この増感作用はシュウ酸が水酸基を固定化してしまつて水素原子と水酸基の再結合を妨げるためだと考えられないこともないが、照射による電気化学的、および化学的影響の検討の結果、この電気化学的容量（電流）の増加の主因子は反応中に生じる励起水分子らしいことがわかつた。系中の水素原子の量は $H_2O^* + M \rightarrow M \cdot OH + H$ (M は還元剤の分子) の反応によって増加してゆく。

強放射線の下では水素原子の再結合が増加して、水素原子が電極に作用する程度は減少してゆくのではないかということが一応考えられる。また同時に、水素原子の高い還元能からして、被照射溶液中では非常に強力な還元作用が起されているのではないかということも期待できる。この点に関して Proskurnin ら³¹⁾ は硝酸塩と亜硝酸塩の水溶液で実験を行つてゐるが、彼らは水と放射線分解生成物 (H, OH) の間には平衡は存在しないので、硝酸塩および亜硝酸塩と水素原子および水酸基との放射線化学的相互関係は非可逆反応であるといつてゐる。水の放射線分解生成物中の還元性物質(水素原子)によつて硝酸塩を亜硝酸塩に放射線化学還元するための最適条件は、アルカリ性溶液で亜硝酸塩濃度が $10^{-3}N$ 以上ある状態である。このときの反応収量は吸収エネルギー $100eV$ あたり 2 分子である。この溶液 ($IN KNO_3 + IN KOH$) にグルコース $10^{-3}M$ を加えると放射線化学還元による亜硝酸塩の収量は増加して吸収エネルギー $100eV$ あたり 6 分子位になる。この効果の説明に Proskurnin らも励起水分子の寄与をあげてゐる。

Veselovsky ら³²⁾ は高い酸化電位を持つ系 ($Ce(SO_4)_2 + Ce(ClO_4)_4$, $K_2Cr_2O_7$, $KMnO_4$) に放射線を当てて変化を調べた結果、 γ 線照射は系の酸化還元平衡を還元体側にずらす性質が

あると報告している。溶液中に酸素のあるときは酸素原子が反応して過酸化水素基 (HO_2) を作り、これが上記の系では還元剤としてはたらいっているのである。

1・3 酸化性分解生成物

水の放射線分解生成物中、酸化性物質の方も電気化学的方法で追求できる。

水酸基、過酸化水素の選択的イオン化電位が電極に示されるのは非常に興味ある事実である。反応は次式のようなのである。

酸素を非常によく吸着する銀は、酸素のイオン化には触媒としてはたらくが水素はほとんど吸着しない。実験の結果、酸素を含まないアルカリ性または弱酸性溶液中の銀電極は水素電極に対して $0.5 \sim 0.6 \text{ V}$ の不安定な可逆陽極電位を示すことがわかつている。さらにこの電極で放射線分解酸化性物質のイオン化に対応する陰極分極電流 ($3 \sim 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) は水素電極電流に比べて小さいし、照射した場合の酸化性物質の拡散電流よりずっと小さい。これは、溶液中に生じた水素原子の電気化学的、化学的活性度が非常に高いために、次のような反応で

水酸基の電気化学的イオン化反応を押さえてしまうからだと思われる。

酸素で飽和したアルカリまたは酸溶液中でコバルト照射 ($\text{約 } 2.0 \times 10^{15} \text{ eV}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$) を行うと白金電極は水素電極に対して 1 V 以上の正の電位を示す。そして、そのときの分極電流 ($10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) は酸化性物質の拡散速度に対応している。

このように酸素分子を溶液に含む場合には、水の放射線分解により生ずる電気化学的活性物は水素原子、水酸基、過酸化水素ばかりではなくて、酸素分子が水素原子を捕獲してできる過酸化水素基 ($\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2$) もあるのではなからうか。

被照射線量測定に第一鉄イオンの酸化反応を用いることはよく知られているが、これはその反応に水の放射線分解生成物酸化性成分の固定

化 (fixation) が含まれている。第2鉄イオンの収量は 0.8 N 硫酸酸性の酸素飽和溶液で吸収エネルギー 100 eV 当り 15.5 当量である。この値は溶液中の水酸基および過酸化水素の酸化作用に対応するものと考えられる。

Proskurnin ら³¹⁾ は酸性度の高い溶液 ($3 \sim 4 \text{ N}$) で鉄の酸化反応を起させると、収量は増加して吸収エネルギー 100 eV 当り 60 当量にまでなることを見出した。これは水の 15 分子が放射線分解して酸化作用を示すことに相当する。そして面白いことに、このとき酸性度を 3 N 以上に上げても、また酸の種類をいろいろ変えてみても (硫酸、リン酸、塩酸など) 第二鉄イオンの収量は変らなかつた。

Fig. 7 The dependence of G value on pH

- the results of Gilat
- the results of Amphlett
- × the results of Dewhurst

硫酸溶液で酸性度の低い範囲については、Gilat¹¹⁾ らが pH と鉄の G 値の関係を報告している (第7図)。pH 2.7 以上で G 値の下るのは過酸化水素基の解離にもとづくものであり、pH 1.3 附近でわずかに下つているのは一次分解生成物によるものであろうと述べている。

γ 線照射下の電極電位の変動に関してはすでに述べたもののほかに Cartledge ら⁷⁸⁾⁹⁾ の一連の報告がある。内容は白金、ステンレス、ジルカロイなどを電極として、照射時間による電位

変化を詳細に検討したものである。

また Lewin ら²⁹⁾は第二回ジュネーブ会議に“放射線の電気化学的效果”と題して Abstract を提出したが、実際の発表は取り止めになった。Abstract から推察すると電解液に X 線または γ 線を照射して電流—電圧曲線が如何に変化するかを調べたもので、特に電極における放射線分解生成物の化学吸着 (Chemisorption) に注目したもののらしい。

1・4 α 線, その他

α 粒子は飛程が非常に短いので溶液中ではさほど影響は示さないだろうと思われたのであるが、実験の結果いろいろの現象が捉えられた

(4)(9)(12)(13)(21)(24)(26)(28)(35)

現在までの実験はほとんどが Po, Pu の溶液で行われているが、Am が自分の出す α 線のため Am³⁺ になりやすいという報告もある³⁰⁾。

Pu 溶液でも同様に α 線により酸化数の低下(還元)の現象がみられ、Rabideau³⁴⁾⁽³⁵⁾らの一連の研究によると過塩素酸溶液中の Pu⁴⁺ は -0.015 酸化度/day の速度で Pu³⁺ に還元されてゆく。その傾向を図示すると第 8 図の如くであ

Fig. 8 The decrease of the mean oxidation number of plutonium ion with time.

る。このとき塩素イオンが共存すると Pu⁴⁺ の還元が押えられ、塩酸のみの溶液では Pu⁴⁺ はほとんど還元されない、過塩素酸イオンも α 線

により還元をうけ $\text{ClO}_4^- \rightarrow \alpha\text{Cl}^- + 2\text{O}_2$ の如く塩素イオンになる (γ 線照射でもこの反応は起る)。この反応が Pu⁴⁺ の還元に関与していると思われるが、反応機構に関する定説はない。もちろん水は α 線によつて放射線分解を受けるから、そのために生ずる過酸化水素、水素、酸素などは前述の γ 線の場合と同様の効果を示す。

また中性子照射により起る水の分解については Allen ら³¹⁾の報告があり、他の放射線と同様過酸化水素、酸素、水素発生がみられる。

そのほか、Barker ら³²⁾は陰イオン交換膜が放射線によつて交換容量を低下させられ、同時に膜抵抗が上昇してくることを報告している。

2. 強放射線下における実験装置

強放射線の下で実験を行うときは遠隔操作を必要とするので、実験装置はできるかぎりの自動化が要求され、また放射線損傷が問題となるので用いる材質も制限されてくる。

Hot Laboratory と Hot Equipment に関するシンポジウムがすでに六回アメリカで開かれており、その論文集が発刊されている⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾。化学実験器具に関してはこれらの論文集に多く記されているのでそれを参照せられたい。ここではそれ以外の文献、とくに電気化学分析に関係した報告をもとにして記す。

2・1 ガラス電極

強放射線性物質を含む溶液の pH を測定するときガラス電極がどの位損傷を受けるかについては二、三の報告があるが²⁸⁾⁽²⁹⁾⁽³¹⁾、たとえば¹⁴⁴Ce—¹⁴⁴Pr を 0.36c/ml 含む溶液で pH を測定するときガラス電極は 2～8 日の間に使用不可能となる。そこで近ごろは一般に鉛とテフロンでガラス電極を包んで放射線から保護し、測定のと きだけ迅速に溶液に接触するように装置的工夫がなされている。

2・2 ポーラログラフ用部品

ポーラログラフの装置的工夫に関しては Horton¹⁶⁾, Jackson¹⁹⁾, Mechelynck²⁵⁾ らの報告がある。ポーラログラフで問題となる部品はいろいろあるが次にそれを列記してみる。

1) 電極：水銀滴下用キャピラリーは非常に

高い線量率の照射を受けると、普通のガラス製のものは茶色に着色してしまう。しかしこれはガラスの電子配位が変わるために着色するのであろうといわれており、キャピラリー定数がただちに変わることはない。この着色はガラスを熱すると消すことができる。石英ガラスを用いると着色は起らないがその必要もなからう。水銀滴下速度の調節は水銀ダメを上下させることが困難な場合が多いので窒素または空気の一圧を加えて調節する。また電解セルを交換するたびに滴下極を上下しなければならないが、Jackson はこれをマグネット操作で行っている。

カロメル電極はなるべく照射を受けない方がよいので鉛などで保護することが望ましい。

2) 電解セル：一般にガラス製であるが、遠隔操作を行うので割れにくいものが使われる。Hudswell ら¹⁷⁾ は Perspex の使用を推奨している。溶液に放射性物質を含む場合には、脱酸素の際に飛散すると危険なので深い容器を用いるか、または遠隔操作可能のフタを付ける必要がある。また、多くの試料を取扱うときには sample auto-changer を工夫しなければならない。

3) その他：溶液注入は自動ピペット、または自動ビュレットで行う、(目盛が小さいと Hot Cell の窓から見にくくなるから注意)。脱酸素は窒素かヘリウムで行うと水の分解が少なくてすむ。ガラス製温度計は高線量率の照射をうけると目盛がみえなくなる。ガス通気などに用いるチューブはポリ塩化ビニールやポリエチレンの方がゴムより損傷が少ない。

また高放射線照射の際に核反応を起すものがある。In, Cd, Hg, Sr などは $r-r$ 反応を起すが ^{60}Co や ^{137}Cs を線源とし、希薄溶液で実験を行う場合には問題にならない。ただし Hg は滴下極として用いれば多量の Hg が被曝することになり放射化される。(できる核種は $^{199\text{m}}\text{Hg}$, $t_{1/2}=44\text{min}$) しかし 1g 当り約 10dpm (飽和の場合) しか放射化されず、半減期も短いので危険はない。この放射性電極の電極反応に関する報告はまだ見当たらない。

なお、放射性物質を含む溶液をポーログラ

フ的に取扱った実験例として Love²⁰⁾ の報告がある。

2・3 遠隔操作の所要時間と精度

Analyst が遠隔操作を習得するためには少なくとも一カ月を必要とするといわれている。(しかしすべての遠隔処理ができるようになるためには6カ月が必要である)。Analyst の訓練に関しては Painter ら²¹⁾ の報告を御覧いただきたい。

遠隔操作を使いこなせる Analyst が遠隔操作と直接操作で所要時間と精度にどの位の開きができるかを Huff¹⁸⁾ は報告している。それぞれの実験法の説明は省略して結果だけを示すと第1, 2表の如くなる。

第1表 遠隔操作と直接操作の所要時間

操 作 法 実 験	所 要 時 間 (分)	
	遠 隔 操 作	直 接 操 作
Zr の電流滴定	108	85
F の電導度滴定	110	83
Al の 滴 定	79	41
酸の電位差滴定	41	25
U のケイ光光度法	102	48

第2表 遠隔操作と直接操作の精度

操 作 法 実 験	精 度 (%)	
	遠 隔 操 作	直 接 操 作
Zr の電流滴定	6.0	6.0
F の電導度滴定	15.0*	6.0
Al の 滴 定	2.1	1.7
酸の電位差滴定	3.1	2.7

*熱加水分解を行わせるときに逃げやすいため。

3. 結 語

以上強放射線下における諸問題について述べたが、人手できなかつた文献が相当あつたので内容的にも淋しいものになつてしまつた。前半は水の放射線分解について相当ページをさいたので、一見かたよつたものになつたが、水溶液を用いて実験をする場合他のいかなる因子よりも大きく響くものであるからその点御了承願いたい。なお水の分解に関しては Proskurnin²²⁾

や Alken ら²⁾の報告も参照されたい。

これからこの分野はますます発展して行くと思われるが、後日また機会が得られればその経過を記してみたいと思う。

4. 引 用 文 献

- 1) A.O. Allen, C.G. Hochanadel : J. Phys. Chem., **56**, 575 (1952).
- 2) A.O. Allen : 1st Geneva Report, **7**, 513 (1956).
- 3) A.O. Allen, H.A. Schwarz : 2nd Geneva Report, **29**, 30 (1958).
- 4) M.C. Anta, M. Haïssinsky : J. chim. phys., **48**, 368 (1951).
- 5) M.C. Anta, M. Lefort : J. chim. phys., **51**, 29 (1954).
- 6) G.C. Barker, A.W. Gardner : AERE-C/M-207 (1957).
- 7) G.H. Cartledge : Nature, **177**, 181 (1954).
- 8) G.H. Cartledge : AEC Report, ORNL-1755 (1955).
- 9) G.H. Cartledge, W.E. Clark : AEC Report, ORNL-2159 (1956).
- 10) A.N. Frumkin, et al. : "Kinetics of Electrode Processes", Moscow Univ. Press (1952).
- 11) Y. Gilat, G. Stein : 2nd Geneva Report, **29**, 43 (1958).
- 12) M. Haïssinsky : Discuss. Faraday Soc., **12**, 133 (1952).
- 13) M. Haïssinsky, M. Pagès : 2nd Geneva Report, **29**, 44 (1958).
- 14) C.J. Hochanadel : J. Phys. Chem., **56**, 587 (1952).
- 15) C.J. Hochanadel : 1st Geneva Report, **7**, 521 (1955).
- 16) A.D. Horton, P.F. Thomason, M.T. Kelly : Anal.Chem., **29**, 388 (1957).
- 17) F. Hudswell, K.L. Wilkinson, J.C. Waldron : AERE-C/R-779 (1957).
- 18) G.A. Huff : AEC Report, IDO-14434 (1958).
- 19) C. Jackson : AERE-ES/R-2491 (1958).
- 20) J.J. Katz, G.T. Seaborg : "The Chemistry of the Actinide Elements" p.365 (1957), Methuen (London).
- 21) M. Lefert : J. chim. phys., **51**, 351 (1954).
- 22) S.Z. Lewin, S. Levinson, J. Klerer : A/Conf. 15/P/938 (1958).
- 23) D.L. Love : Anal. Chim. Acta, **18**, 72 (1958).
- 24) W.R. McDonnell, E.J. Hart : J. Am. Chem. Soc., **76**, 2121 (1954).
- 25) Ph. Mechelynck : 2nd Geneva Report, **28**, 579 (1958).
- 26) N. Miller, J. Wilkinson : Trans. Faraday Soc., **50**, 690 (1954).
- 27) M.J. Painter, G.A. Huff : AEC Report, IDO-14396 (1957).
- 28) J.H. Pannell : AEC Report, CF-52-4-156 (1952).
- 29) J.H. Pannell, R.E. Blanco, A.H. Kibbey : AEC Report, AECID-3529 (1952).
- 30) J.H. Pannell : Nucleonics, **13**, (8), 48 (1955).
- 31) M.A. Proskurnin, V.D. Orekhov, A.I. Chyornova : "Symposium on Radiation Chemistry, Moscow, 1955", p.75 (1956), Consultant Bureau Inc., N.Y.
- 32) M.A. Proskurnin, Y.M. Kolotyrkin : 2nd Geneva Report, **29**, 52 (1958).
- 33) J. Pucheault, C. Ferradini : 2nd Geneva Report, **29**, 24 (1958).
- 34) S.W. Rabideau, H.D. Cowan : J. Am. Chem. Soc., **77**, 6145 (1955).
- 35) S.W. Rabideau, M.J. Bradley, H.D. Cowan : AEC Report, LAMS-2236 (1959).
- 36) J. Teply, J. Bednar : 2nd Geneva Report, **29**, 71 (1958).
- 37) V.I. Veselovsky, Ts. I. Zalkind, N.B. Miller, N.A. Aladzhalova : "Symposium on Radiation Chemistry, Moscow, 1955", p.25 (1956), Consultant Bureau Inc., N.Y.
- 38) V.I. Veselovsky, Ts. I. Zalkind : "Symposium on Radiation Chemistry, Moscow, 1955", p.51 (1956), Consultant Bureau Inc., N.Y.
- 39) V.I. Veselovsky : 1st Geneva Report, **7**, 599 (1955).
- 40) AEC Report, ANL-4670 (1951).
- 41) AEC Report, CF-52-10-230 (1952).
- 42) AEC Report, BNL-302 (1954).
- 43) AEC Report, TID-5280 (1955).
- 44) "Hot Laboratory Operation and Equipment", Vol.3 (1957), Pergamon (London).
- 45) "Sixth Hot Laboratories and Equipment Conference, Chicago, 1958."