

ラジオ・アイソトープの産業利用とその影響

—主として工業利用—

植村福七

本稿は昭和三十三年度文部省科学研究費交付金による研究「原子力の産業利用とその影響」の一部である。

目次

- 1、序 説
- 2、ラジオ・アイソトープの特性
- 3、ラジオ・アイソトープの産業利用
- 4、結論—技術革新と経済成長

一 序 説

物質構成の最小単位を原子という。原子は九二種あり、陽子と中性子からなる原子核とその周囲を一定の軌道をえがきながら運動している電子からなっている。原子核の陽子の数がその原子番号 (atomic number) をあらわす。例えばウラニウムの場合、陽子の数は九二であるから原子番号は九二である。原子核中の陽子の数 Z と中性子の数 N との和 $A \equiv Z + N$ を質量数 (mass number) とい⁽¹⁾う。例えば九二の陽子と一四六の中性子からなるウラニ

ラジオ・アイソトープの産業利用とその影響

(二五五)

一

ウムは $92 + 146 = 238$ 即ち質量数は二三八でこれは ^{238}U と書き表わす。

同じ個数の陽子をもった原子によってでき上がった物質を元素と呼ぶ。また陽子の数が等しくて中性子の数が異なる元素、即ち同じ原子番号で質量数の異なるものを同位元素 (isotope) という。例えばウランニウムの場合 ^{238}U 、 ^{235}U は互に同位元素又は同位体と呼ばれる。同位元素は物理的性質は異なるけれども化学的性質は同じである。

同位元素の中には自然に放射線を放出して他の元素に変化していく性質のものがある。その性質を放射能、そういう元素を放射性元素という。これは原子核が安定していないことを意味し、放射線を出して崩壊していき、他の元素に変化していくのである。放射線にはアルファ線、ベータ線、ガンマ線の三種類がある。アルファ線は陽子二個と中性子二個のヘリウム・イオンの流れで、陽電気を帯びており、ベータ線は高速の電子の流れで陰電気を帯びており、ガンマ線は透過力の強い電磁波であることがわかってきた。放射性の同位元素のこわれる速度はそれぞれ異なり、丁度半分の量に減るまでの期間を半減期という。半減期は次の如く一億分の数秒のものから何億年のものまでさまざまである。

炭	素 (C^{14})	4,700年
ラジウム	(Ra^{226})	1,600年
ウラン	(U^{235})	7億年
ヨウ素	(I^{131})	8日
ポロニウム	(Po^{212})	1億分の26秒

放射性同位元素 (Radio-isotope 以下簡単に RI という) は一九一一年イギリスの Frederic Soddy 博士によって名付けられた。ギリシヤ語で iso とは same (同じ) topos は place (場所) という意味である。(2) 一九三四年ア

アメリカの Ernest O. Lawrence 博士が始めてサイクロトロンによって放射性同位元素を作ること成功した。一九四二年 Fermi 教授の連鎖反応の実験成功によって本格的に原子炉で作られるに至った。⁽³⁾ 従来サイクロトロンによって RI を作ることは分量的にも限度があり費用の点でも高価につくので一般に普及するに至らなかった。Gordon Dean 前原子力委員長はその著「原子に関する報告書」の中で一、〇〇〇基のサイクロトロンが一億ドル以上の費用をかけて生産しうる量を一基の原子炉は一週間のうち約一万ドルの費用で作りに出すことができる⁽⁴⁾と述べている。

一九四六年アメリカは RI を一般に配分する道を開き、続いて一九四七年イギリス、カナダも RI の輸出を許可し

実際に用いられている R I

核種	元素名	核種	元素名
Ag ¹¹⁰	銀	P ³²	燐
Au ¹⁹⁸	金	Po ²¹⁰	ポロニウム
Ba ¹⁴⁰	バリウム	Pm ¹⁴⁷	プロメシウム
Be ⁷	ベリリウム	Rb ⁸⁶	ルビジウム
C ¹⁴ Compound	炭素	Ru ¹⁰⁶	ルテニウム
Ca ⁴⁵	カルシウム	S ³⁵	硫黄
Cd ¹¹⁵	セドミウム	Sb ¹²⁵	アンチモン
Ce ¹⁴¹	セリウム	Se ⁷⁵	セリウム
Cl ³⁶	塩素	Sn ¹¹³	錫
Co ⁶⁰	コバルト	Sr ⁸⁹	ストロンチウム
Cs ¹³⁷	ムセシウム	Sr ⁹⁰	〃
Cr ⁵¹	クロム	Ta ¹⁸²	タンタル
Fe ⁵⁵	鉄	Tc ⁹⁹	テクネシウム
Fe ⁵⁹	〃	Tl ²⁰⁴	タリウム
H ³	ヘリウム	Tm ¹⁷⁰	ツリウム
Hg ²⁰³	水銀	Tr-Zr	テルル-ジルコニウム
Hf ¹⁸¹	ハフニウム	W ¹⁸⁵	タグステン
I ¹³¹	沃度	Y ⁹¹	イットリウム
Ir ¹⁹²	イリジウム	Zn ⁶⁵	亜鉛
Na ²²	ナトリウム	Zr ⁹⁵	ジルコニウム
Ni ⁶³	ニッケル		

に 応 ず る た め
 現 在 建 設 中 の
 CP-5 型 原 子 炉
 の 完 成 を ま っ て
 試 験 的 生 産 を 行
 い、 将 来 天 然 ウ
 ラ ン 重 水 型 原 子
 炉 の 建 設 に よ り
 本 格 的 に 生 産
 し、 自 給 体 制 を
 確 立 せ ん と し て
 い る。
 RI の 最 近 の
 輸 入 実 績 を み れ
 ば 下 表 の 如 く で
 あ る。

R I 別 輸 入 実 績 (単位 mc, Co⁶⁰はC)

RI 別	25年度	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度	備 考
Co ⁶⁰	—	—	170	200 (188)	243 (121)	3,977 (1,637)	カッコ内は前年 に対する割合
P ³²	249	785 (316)	3,458 (440)	5,740 (165)	10,129 (179)	15,575 (154)	
I ¹³¹	—	236	1,256 (530)	2,701 (215)	6,250 (232)	10,070 (160)	
C ¹⁴	11	23 (200)	47 (205)	52 (111)	95 (183)	141 (148)	
S ³⁵	15	76 (506)	277 (364)	292 (103)	496 (170)	835 (169)	
Ca ⁴⁵	10	59 (59)	392 (664)	408 (102)	539 (135)	735 (136)	
その他合計	177	357 (202)	971 (272)	3,436 (353)	7,204 (204)	15,669 (223)	

RI 年度別審査区別使用者数使用件数

申請年 度別 審査 区別	昭25年度		昭26年度		昭27年度		昭28年度		昭29年度		昭30年度		
	使用者	件数	使用者	件数	使用者	件数	使用者	件数	使用者	件数	使用者	件数	
物 理	11	13	13	16	28	44	38	54	35	63	44	70	
化 学	9	10	33	35	36	57	47	75	50	92	74	136	
工 学	(物理化学に含む)				39	64	23	40	68	91	97	152	
生 物 学	}	20	24	34	44	31	40	26	29	27	29	46	57
農 学						29	35	56	67	72	99	130	215
動 物 学					13	14	16	18	32	76	72	112	
医 学	66	92	90	135	281	405	391	617	487	806	933	1,462	
そ の 地	—	—	2	2	6	6	11	11	15	18	11	15	
合 計	106	139	172	232	465	663	608	911	786	1,274	1,404	2,217	

ラ ジ オ ・ ア イ ソ ト ー プ の 産 業 利 用 と そ の 影 響

地域別使用機関数

地域別	機関別	試験研究機関	大 学	病 院	事 業 所
北 海 道		1	8	—	1
東 北		1	15	4	—
関 東		38	56	30	26
東海・近畿		10	40	18	21
北陸・山陰		1	8	5	1
中国・四国		3	8	9	5
九 州		1	14	7	2
計		55	149	73	56

使用者数及び使用件数の増加状況は次表の如くである。

第三十一卷 第三号

利用部門別 RI 別使用件数 (1956年1月現在)

核 種	部 門	理 農 工 医 他					計
		理	農	工	医	他	
I ¹³¹	沃素	19	6	5	440	5	475
P ³²	磷	85	232	46	1295	29	1687
S ³⁵	硫黄	56	65	73	131	13	338
Cl ³⁶	塩素	22	7	13	48	1	91
Ca ⁴⁵	カルシウム	29	67	30	291	14	431
C ¹⁴	炭素	52	46	45	94	7	244
Fe ⁵⁹	鉄	4	6	9	58	—	77
Fe ⁵⁵	鉄	2	5	13	48	—	68
Co ⁶⁰	コバルト	42	25	77	245	7	396
Zn ⁶⁵	亜鉛	14	6	13	25	1	59
Ag ¹¹⁰	銀	16	2	13	1	3	35
Sr ⁸⁹	ストロンチウム	5	6	11	57	2	81
Sr ⁹⁰	ストロンチウム	21	9	40	45	4	119
Hg ²⁰³	水銀	2	2	8	3	—	15
Sc ⁴⁶	スカンジウム	3	—	—	—	1	4
As ⁷³	砒素	2	—	1	1	—	4
Na ²⁴	ナトリウム	—	—	—	1	—	1
Na ²²	ナトリウム	4	—	4	2	—	10
Ba ¹⁴⁰	バリウム	5	—	1	—	—	6

(二六〇) 六

ラジオ・アイソトープの産業利用とその影響

Tu ¹⁷⁰	ツリウム	—	—	2	4	—	6
Eu ¹⁵²	ユーロビウム	1	—	—	—	—	1
Cr ⁵¹	クロム	1	—	2	8	—	11
Tl ²⁰⁴	タリウム	6	—	9	—	1	16
Sb ¹²⁴	アンチモン	4	—	4	14	3	25
Sb ¹²⁵	アンチモン	2	—	1	1	—	4
Ir ¹⁹²	イリジウム	1	—	—	—	—	1
Ta ¹⁸²	タンタル	—	—	2	—	—	2
Cd ¹¹⁵	カドミウム	1	—	—	1	—	2
W ¹⁸⁵	タングステン	2	—	4	—	4	10
Se ⁷⁵	セレン	1	2	—	—	—	3
Y ⁹¹	イットリウム	1	6	1	4	3	15
Ce ¹⁴¹	セリウム	—	1	—	5	1	7
Ce ¹³⁴	セリウム	2	—	1	1	1	5
Ce ¹⁴⁴	セリウム	3	3	3	5	—	14
Sn ¹¹³	錫	2	2	3	—	—	7
Ni ⁶³	ニッケル	3	—	—	1	—	4
Ge ⁷¹	ゲルマニウム	1	—	1	—	—	2
Tc ⁹⁹	テクネチウム	1	—	—	—	—	—
Be ⁷	ベリリウム	2	—	—	—	—	—
Ru ¹⁰⁶	ルチニウム	1	1	2	—	—	4
Cs ¹³⁷	セシウム	8	7	15	22	2	54
H ³	水素	—	—	1	—	—	1
Nb・Zr ⁹⁵	ニオブ・ジルコニウム	1	5	3	2	1	12
Hf ¹⁸¹	ハフニウム	2	—	—	—	—	2
Rb ⁸⁷	ハビジウム	—	1	—	—	—	1
Pm ¹⁴⁷	プロメシウム	1	1	—	—	—	2
分裂生成物		15	7	10	22	4	58
計		444	520	466	2875	107	4412

(二六)

七

わが国における RI の利用は年々益々増加の傾向にある。原子力局資料によりわが国の RI の昭和三六年度までの需要想定をみれば次の如くである。

わが国の主な RI の需要想定

(単位はmc, Co⁶⁰はC)

RI	年度	昭31年度	昭32年度	昭33年度	昭34年度	昭35年度	昭36年度	計
Co ⁶⁰		22,700	47,720 (2,720)	68,910 (8,110)	72,710 (15,410)	88,890 (22,290)	92,710 (30,280)	393,640
P ³²		23,360	35,040	52,560	78,840	148,260	177,400	
I ¹³¹		15,000	23,500	35,550	52,870	79,310	118,968	
C ¹⁴		211	316	474	711	1,066	1,599	
S ³⁵		1,250	1,870	2,810	4,220	6,330	9,500	
Ca ⁴⁵		990	1,340	1,810	2,430	3,290	4,450	

- (注) 1. ()数字は年間補充量
 2. Co⁶⁰は年間補充率を12%とし、1年毎に前年度の減衰量を補充することとする。
 3. 年間増加率はP³²、I¹³¹、C¹⁴、S³⁵は50%、Ca⁴⁵は35%、Co⁶⁰は積上方式をとった。

昭和36年度末における各部門別RIの使用推定量

部 門 別	使用推定量	
工業部門	石油	2,000
	合成繊維樹脂	26,000
	ゴム	2,000
	造船	2,000
	鉄鋼	8,500
	国立公立研究所	30,000
	大学関係	21,000
	下水関係	100
	計	91,600
	農業部門	国立研究機関
農水畜産物 殺菌貯蔵関係		20,000
計		28,000
医学部門	国立病院	29,000
	国有病院	10,900
	公立医療機関	15,000
	大学病院	37,000
	その他	24,330
	計	116,230

RIの利用分野別構成比率は一九五五年実績についていえば、医学七〇%、農学部門二〇%、工業部門一〇%であるが、一九六一年においては左表の如く医学三七%、工業部門三〇%弱と工業部門の利用が飛躍的に増加することが予想されている。

アイソトープ・センター	15,000
放射線総合研究所	3,100
その他	60,000
合計	314,830
年間補充充分 (補充率0.12%)	78,810
総計	393,640

(科学技術庁原子力局推定)

ラジオ・アイソトープの産業利用とその影響

ジュネーヴの原子力平和利用国際会議で、アメリカ原子力委員会の Libby 委員は過去十年間に人類は RI の利用によって約一〇億ドルに相当する利益を得たであろうと発表したが、RI の研究は基礎科学としての物理学、化学及び生物学の領域のみならず、その応用は広く医学、農学、工学はいうまでもな

アメリカ産業における RI の利用分野としての効果

利用分野 (許可概数)	節約額 (単位百万弗)	
	低	高
シガレット・ゲージ (2,235)	35.1	58.6
金属厚み計	18.5	27.8
ゴム・タイヤ厚み計	7.9	20.0
プラスチック厚み計	1.6	4.9
紙関連工業厚み計	18.6	20.0
その他厚み計	2.0	5.9
水位計・温度計・H-C計など	1.8	5.4
ラジオグラフィック・テスト	26.0	58.5
油井ロッキング	16.0	24.0
油井ステミュレーション	120.0	180.0
パイプライン	0.5	0.7
石油精製	5.3	10.1
その他トレーサー	12.5	25.0
一般磨耗計	0.8	1.2
ピストンリング磨耗計	12.0	18.0
腐食研究	3.0	4.6
その他究研	12.0	18.0
発光源	1.7	2.7
微細加工利用	0.5	0.8
計	295.8	486.0
平均	391.0	

(1956年12月末)

く、あらゆる方面に及んでおり、現状からいって、既に相当の効果をあげているが、今後の発展を予想すると、到底測り知ることができないものがある。

1、宗宮尚行「アイソトープの特質と利用」原子力工業 一九五七 十一月号

2、「アイソトープという言葉の起源」原子力工業 一九五八 三月号 三一頁

英国グラスゴウ市のユニバシティ・ガーデン一ノ番地にある家にアイソトープという言葉をはじめて提案したいわれを書いた記念額がかかっている。この家はフレデリック・サッディーの博士の義父(冶金学者ジョージ・ベルビー)の住宅であったが現在大学に移管されている、サッディーはアイソトープの研究をしていたが、その講義の時に、周期律表の同じ場所にある元素を区別する必要に迫られた。そこで彼はマーガレット・トッド博士(医学ジャーナリスト)に相談し、トッド博士がギリシヤ語で *isolepo* という新語を提案した。これがアイソトープという言葉の起りである。サッディー博士がこの言葉をはじめて印刷物に用いたのは一九一三年であった。

3、一九四二年十二月二日シカゴ大学の Enrico Fermi 教授は大学運動場 Stagg Field の一隅ではじめて自動的に進行する連鎖反応の実験に成功した。現在同所には次の字句が刻まれた記念銅碑が掲げられている。On December 2, 1942. Man achieved here the first self-sustaining chain reaction and thereby initiated the controlled release of nuclear energy.

4 Gordon Dean, Report on the Atom, 1954

5、この表は日本放射性同位元素協会発行の「協会ニュース」1956年 No. 28 によった。

6、7、原子力年鑑、一九五七年版、第三三〇—三三二頁

二 放射同位元素の特性

RI は次の物理的乃至化学的性質をもっている。RI の工業利用はこれらの物理的乃至化学的性質を生産技術に応

用したものである。

(一) RI はどんな条件でも一定の法則に従って崩壊し、固有の放射線を出す。しかも放射線はどんな微少でも検出器によって検出することができる。例えばガイガー計数器を用いて放射能をはかる場合次の量が存在していれば検出できる。

Na^{24}	ナトリウム	4×10^{-10}	グラム
Po^{210}	ポロニウム	3×10^{-10}	グラム
C^{14}	炭素	10^{-13}	グラム

炭素の場合でいえばゴマ粒一個の重さは約 1.0×10^{-6} グラムであるから、その約一〇億分の一程度の重さのもので検出できるわけである。また物質によって放射能の種類やその放射強度が異なるので、その放射能をよく調べると、もとの物質の存在が確認される。このことも放射能が利用される理由となる。これが RI のトレーサー利用の原理である。

(二) 放射線を物質にあてると放射線自体に変化が起きる。即ち透過、吸収、散乱及び電離の現象が起る。放射線が他の物質に当たった場合、その周囲にある電子をはじきとばしたり或いは原子核と衝突して自分のもっているエネルギーを消耗して、遂に物質の中に消えてなくなったりする。即ち吸収されてしまうという性質をもっている。この原理はわれわれが光を感じずる場合、光源と目との間に色ガラスを入れると光は次第にガラスに吸収されて、われわれの目に感じられなくなると同様である。放射線の場合もこれと同様で、吸収物が厚いほど透過する量は減ずる。これは厚くなると原子と衝突してそのエネルギーを失う確率が増加するからである。吸収物が厚くなるに従って透過してくる放射線が減少する関係を数式で表わすと次の如くなる。

$$I = I_0 e^{-\mu t}$$

I_0 = 吸収体が全然ない場合の放射線の強さ

t = 吸収体の厚さ

μ (ミュウ) = 吸収体がどの位放射線を吸収するかを示す吸収係数

$I = t$ なる厚さの吸収体を透過して出てくる放射線の強さ

e = 数学でいう指数

この数式を図で表わすと次の如くなる。⁽²⁾

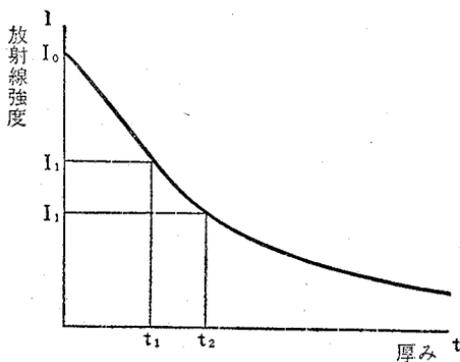
上図の如く吸収体が厚くなるにつれて、放射線は次第に弱くなる。吸収の度合を示す量として強度が最初の半分になる厚さを半価層という。ガンマ線が一番透過力が強く、ベータ線、アルファ線がこれにつぐ。例えば CO_{50}

(コバルト) ガンマ線は鉛三五ミリメートルを透過してなお最初の $\frac{1}{10}$ の

強度をもち、 Si^{90} (ストロンチウム) のベータ線ではわずか一・二ミリメートルの鉄板でも完全に吸収されてしま
い、アルファ線では空気中でも相当吸収される。いづれにしても放射線の吸収透過作用を産業的に利用する場合の

原理は $I = I_0 e^{-\mu t}$ の関係である。

次にベータ線は高速の電子で、ある物質にベータ線が当たった場合核の周囲の電子と衝突する。ベータ線も核のまわりの電子とともに負の電荷をもっており、負と負は互に反撥されて散乱する。これを散乱現象という。一般に原子番号の多いもの程核の周囲の電子は多いから、散乱する割合即ち散乱強度は大である。散乱強度は物質の厚さに関係をもち、一般に厚くなるにしたがい散乱線の強さは大となる。これは厚くなるにしたがい原子と衝突する確



率が多くなるからである。⁽²⁾

第三に放射線により核のまわりの電子がはじきとばされるから核の正の電荷とまわりの電子の負の電荷とのバランスがくずれる。これを電離作用という。吸収と散乱の現象には必ず電離作用がついて起る。この変化を起させる能力即ち電離能力はアルファ線が一番強く次にベータ線がこれにつき、ガンマ線は非常に弱い。正確にいえばガンマ線はそれ自身電離作用を起すことはできないが、コンプトン効果や光電吸収を起す場合ははじきとばされた電子がベータ線と同じ役目を果たし電離作用を起すことになる。ガイガー計数器とが電離管はこの放射線の電離作用を利用した放射線測定器で、ベータ線とかガンマ線かその管壁に当たって出した電子によって内部の気体が電離され、これらを電極に集めるようにしたものである。

以上の放射線のもつ特性吸収、透過、散乱、電離作用を応用したのを放射線源利用という。

(三) 放射線を物質に照射するとその物質の物理的性質や化学的性質に変化を起させる。まず放射線は物質を構成している核外電子と衝突し、放射線の種類やそのエネルギーに応じて原子を励起して、高いエネルギーの状態になり、核外電子を追出してイオン化する。次にこれらの原子は物質内に二次的に物理的や化学的変化をいろいろとひき起し、新しい性質が生れてくるのである。このようにある物質に放射線を照射することにより物質の性質に変化を与える方法を照射利用という。

1、原子力講座 二、応用編 一、「同位元素とその応用」四一頁

2、同、四九一五〇頁

3、散乱現象の場合ガンマ線は電子に衝突して自分のもっているエネルギーをすべてその電子に与える場合(光電吸収)とエネルギーの一部をその電子に与え残りのエネルギーで自分も入ってきた方向と別の方向に散乱する場合(コンプトン効果)とがある。

ラジオ・アイソトープの産業利用とその影響

三 放射性同位元素の産業利用

放射性同位元素の産業利用は上記の物理的・化学的特性を産業技術に応用するもので、次の三つに分類することができる。

放射性同位元素の産業利用

- 1 追跡子利用
- 2 線源利用
- 3 照射利用

(一) 追跡子利用

追跡子 (tracer) 利用とは調査物に放射能を混入しておき、その放射能を追跡することによって調査物の状態を知る方法である。詳言すれば一つの母体があって、その母体の行動、性質、量などを調べる場合、母体と性質の似かよっている放射性物質を加え、加えたものを追跡することによって母体を調べる方法である。この加えるものをトレーサー (tracer) と呼び、このような研究をトレーサー実験又は利用という。トレーサーに用いるものは母体の性質を変えることなく、また母体と行動を共にするもので、できるだけ少量でしかも検出できるものが望ましい。この点 RI は最も適している。同位元素であるから、行動は完全に母体と共にし、放射性であるから容易に検出できる。又 RI は固有の放射線を出すので分析手段としても利用される。

農業牧畜部門における RI の追跡子利用はかなり多い。まず光合成であるが比較的早くから研究されていた。植物は葉緑素の働きと太陽の光線の助けとで、空気中の炭酸ガスから炭素を自分の体内にとり入れて生活し、生長している。太陽の光をどのくらいあると、どの位の炭素ができ、それが体内のどの場所にとり入れられるかという

A. トレーサー利用

ラジオ・アイソトープの産業利用とその影響

応用面	例
農 林 業	1. 土壌の性質究明 2. 施肥方法の改善適正 3. 光合成の解明 4. 害虫駆除 5. 農業の効果判定
水産・畜産業	1. 飼料改善 2. 家畜・家禽の栄養研究
鉱 工 業	1. 工程の管理（流動、流速など） 2. 生産工程の改善（製鉄、食塩、電解など） 3. 化学反応の解明（ゴム加硫、重合、分解など） 4. 機構の解明（吸着、拡散、腐蝕、摩耗など） 5. 液体輸送の目印（石油輸送）
土 木	1. 土砂の移動調査（港湾建設など） 2. 漏水の検出 3. 地下水の状態調査

B. 分析手段

応用面	例
物質量の測定	1. 体内の血液、水分の定量 2. 溶解度、蒸気圧などの測定 3. 稀元素の分析
年齢の推定	1. 鉱物の年齢 2. 古代木材の年齢

ことを知るのが、光合成のなぞを解く第一歩である。植物の体はもともと炭素の化合物であるが、新しく外から入ってきた炭素と、もともと体内にある炭素とは全く同じであるから、一般の化学的方法では区別することができない。又植物は生長し、一部分は衰滅していくから、重量の変化を測っても新しく取入れた量も場所も知ることはできない。炭素の同位元素¹⁴Cを追跡子として用いれば、この関係を判明させることができる。

しかもその放射線で写真乾板を感光させれば、はっきりと所在場所を確かめることができる。アメリカでは光合成と肥料と組合せて、どんな肥料の時光合成が盛んになるかという研究が行われている。

次に施肥方法の改善であるが、土壌中の磷酸と肥料中の磷酸は共に天然の磷酸⁽¹⁾であって、肥料磷と土壌磷の区別は如何なる方法を以てしてもできず、肥料吸収量も分らなかった。これが従来施肥改善のための肥料試験の前進をばんでいた。ところが肥料に RI で目印をつけ、これをガイガー計数器で植物を調べることによってその肥料が吸収されているかどうかを調査することができるようになり施肥方法が非常に改善された。第三に農業方面のトレーサー利用としては灌漑用貯水池の堰や堤の漏水調査に用いられる。わが国の農業用溜池は古くから発達し、その数も非常に多く重要な灌漑水源となっている。しかし地質の複雑なわが国では堰堤基礎地盤が悪いのが多く、これが溜池漏水の原因となっている。漏水堰堤をそのまま放置することは極めて危険なことで、何時惨事を引き起さないとも限らない。RI のトレーサー法を利用してこの漏水調査をすることができる。この方法はわが国においても既に山形県蛙沢溜池、滋賀県野淵川ダム、外数カ所の漏水溜池で実施されたことがある。⁽²⁾

畜産方面における RI のトレーサー利用で主なるものは家畜、家禽の栄養研究である。即ち従来飼料中のカルシウムと磷の吸収率が判定できなかったが、RI の利用によって正確に算定できるようになった。

工業方面における RI のトレーサー利用は極めて広汎である。まず金属及び機械工業では鉄鋼製錬においてその対象物が主として熔鉄、熔鋼のごとく高温であり、反応機構も複雑をきわめ、熔鉱炉の如きもその内部においてはどのようなことが起っているか解明されない点が沢山ある。しかし、RI の採用により従来複雑であり困難であった測定や試験が単純化され容易、迅速、正確に行えるようになった。⁽³⁾ 又非鉄製錬の場合においても RI は鉄鋼製錬と同様に各方面に亘って用いられている。⁽⁴⁾

化学工業における RI の利用については、 $P_{2}S_{5}$ (燐) や $S_{2}S_{3}$ (硫黄) の検出限度は $10^{-11}g$ という小やいもので化学天秤の感度の一〇〇万倍以上に当るので、トレーサー利用がどれだけ鋭敏且有効なものであるかが容易に理解できるであろう。こうした追跡方法は化学工業の基礎をなす研究実験に数多く利用され、今度もますますその度を増して重要な発明の緒口となるであろう。分析の精度や速度を向上させる点も著しく、また化学処理過程中の一元素の動きを追跡して、従来不明であった反応機構を解明し、作業能率の増進品質向上に役立ったことは枚挙にいとまない程である。⁽⁴⁾

電気工業における RI のトレーサー利用は電気機械部品の摩耗試験、電解やメッキの機構や製造工程の研究、ダムの漏水調査などに使用されている。まず発電関係では Co^{60} による送水管中の水の流速測定、 Co^{60} による積雪量の測定、又水力発電所のタービン翼のキャビテーションによる摩耗量の測定、ダム用セメントの分布状況調査等に用いられる。又電気機械関係としては欠陥検査、摩耗試験、材料研究などに Co^{60} (コバルト)、 Cs^{137} (セシウム) などのガンマー線が用いられる。電気部品への利用としては RI を用いて半導体その他の材料の研究が行われている。電気化学関係では RI をトレーサーとして用いた場合が多く、電解やメッキの機構を明らかにするための研究が数多くなされている。⁽⁵⁾

繊維工業においては繊維化学、繊維物理の基礎研究にトレーサー・テクニクが多く活用されている。例えば繊維製造工程の研究において S_{32} (硫黄)、 Na^{22} (ナトリウム) などを用いてビスコース化、アルカリ浸漬の反応などの研究、ノズル詰りの防止剤の界面活性剤、例えばオレイン酸ソーダに N^{14} で標識を与え微量の油剤の分布を知る。又 Cs^{137} 、 Cs^{135} を少量混ぜ Cs_{2} (セシウム) ガスの微量の洩れを検知する。或いは Sc^{45} を用いた廃水の研究等がある。ただ製造工程のみならず紡織工程、染色仕上げ工程においては RI のトレーサー・テクニクの利用の

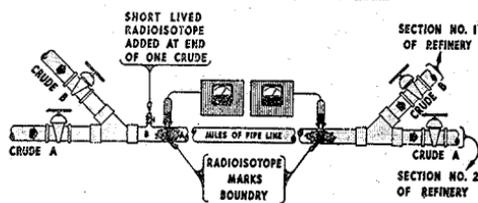
途はひろい。例えばドラフト域における繊維の挙動——繊維の通過時間によって繊維の速さとその分布を求める——の研究、オイリングむらの検出、制御などに用いられる。又染色仕上げ工程では洗浄、吸着量の測定、防退剤、防水剤、予軟剤、樹脂などの処理剤の系織物上の分布の測定等に用いられている。⁽⁶⁾

石油工業においてはアメリカでは早くから RI のトレーサー利用が本格的に行われている。即ち製油作業の調整、製品の混合、貯蔵、輸送及び管理、又製品の分析、品質評価試験に広く利用されている。石油製精製並びに製品輸送における RI の利用法を分類すれば次の如くである。

- 1、流速の測定
- 2、流動状態の測定
- 3、混合又は分離状態の確認
- 4、パイプライン内の二液界面の指示
- 5、漏洩試験

例えば油田で採油され精製された石油を遠く離れた貯蔵タンクに送る場合、同じ送油管を通じて異種の石油を順次送る必要がある。その場合異種石油の境界にガンマー線を出す Ba^{130} (バリウム) を注入して送油管に入れておくと、タンクの近くの分岐点まで流れてきたときガイガー計数器がガンマー線を感じ、その出力信号で警報を鳴らし自動的に弁を開閉することによって異種石油を別々のタンクに入れることができる。この方法は石油に限らずその他の液体、気体の輸送にも応用できる。従来は管から少しサンプルを抽出して流体の種類を見分けたり、流速をはかったりしたものであるが、放射能を用いれば外部から簡単に見分けることができ

異種石油境界測定



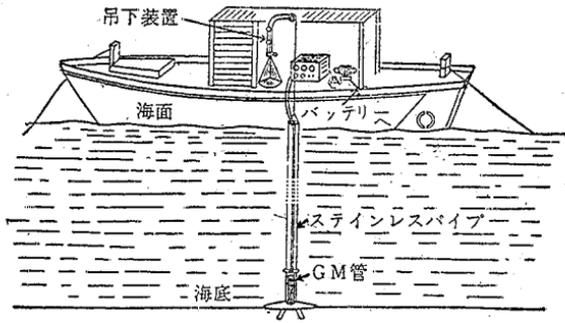
非常に便利である。⁽⁷⁾

鉍素方面におけるトレーサー・テクニクとしてはまず放射能探査である。最近放射能探査は急速に発展してきた。その中でも放射性鉍物鉍床の探査と石油坑井に対する応用は著しいものがある。放射性鉍物鉍床の探査は地中及び地表探査の二つに分けて行われている。地中探査は検層器、ガイガー計数器、シンチレーション計数器の如き放射能測定器を用い、地表探査には主に移動用測定器(シンチレーション・ヘッドを自記記録式レコーダーに結合したもの)、携帯用測定器などを用いて行っている。その他空中探査、自動車による探査なども以上の計器が用いられている。石油坑井の放射能検層は、帝国石油会社がアメリカのウエルサーバー社製検層器を使用して、セメント水止め、セメント注入後の位置のチェックなどに利用し、また宇部興産では科研製のガンマー線検層器を用いて、炭田の試錐坑のガンマー線検層を行い、炭層深度の探査にすぐれた結果を得ている。この外選鉍プロセスにおける浮選剤、気泡剤、捕収剤、活性剤、抑制剤の研究に RI のトレーサー・テクニクが用いられる。⁽⁸⁾

次に地質調査、土木建設、港湾建設における RI のトレーサー利用についてみると、伏流水の水路調査、流水の流速調査などに P^{32} が用いられている。伏流水の問題は工業用水その他地下水関係において重要であり、使用される RI は Br (臭素、I (伏度)) の様に放射性の強い半減期の長いものがよい。

又洪水調査、港湾の砂泥移動調査には Co^{60} (コバルト) Zn^{65} (亜鉛) Cr^{51} (クロム)、が用いられている。例えば港湾建設の場合、海底の土砂が風波、海流によってどのように移動するかを調べることは港湾設計上重要な問題である。この種の試験がフランスの地中海海岸及びわが国の苫小牧港で行われた。わが国の苫小牧港については一九五五年ジュネーブ原子力平和利用国際会議に報告されているが、まず放射性の Zn^{65} (亜鉛) をガラス状の物質に混入し砂状とし一定範囲の海底に撒布して、何日かを経て海底にガイガー計数器をおろしその放射線強度の測定

港湾砂泥移動調査



により、撒布した範囲からどのように土砂に押し流されてひるがっているかを調べたものである。これによって土砂の移動が判明し、適切な設計によって莫大な国費が節約された。⁽⁹⁾

又土中を通っている水道管や通信用ケーブルの故障発見に放射能が用いられる。例えばロンドン市は数百年間発達してきた古い都市で地下には地下鉄、通信用ケーブル、送電線、ガス管、また水道管が入り組んでおり、水道管の検査のため広汎に土地を掘りかえしたりすることは、ほとんど不可能に近いことである。従って Na^{24} (ナトリウム) を上水に混入して管に流すと、 Na^{24} は故障のある穴にしみ込む。あとは水で洗って管をからにし、一方から管にちょうどまるゴム袋をつけたシンチレーション・カウンターを奥の方へ送⁽¹⁰⁾ってやる。するとシンチレーション・カウンターは管の中を進んで行き、管中の穴のある場所に達すると計数が急激に増加することによって欠陥を発見する。

又 RI トレーサー利用としては地質年代の測定にも用いられる。これは天然物中には放射性同位元素を含有されているからその放射性変脱の程度を研究することによってこの天然物が生成された地質年代を明かにすることができる。

(二) 線源利用

線源利用 (radiation source) とは RI からの放射線と物質との相互作用を利用して、物体の状況を検査したり改良したりする方法である。即ち放射線の四つの作用—透過、吸収、散乱、電離—を利用した方法である。

放射線源としての利用

主として利用される特性	応 用 例
透過、吸収、散乱	1. 厚み計 2. 液面計 3. 比重計 4. 濃度計 5. 積雪計 6. ラジオグラフィ (非破壊検査)
励起、電離	1. 原子電池 2. 静電中和器 3. 放電管スターター 4. 照 明 料 5. 夜 光 塗 料

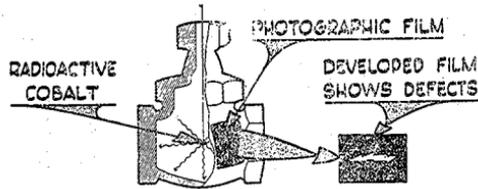
ラジオ・アイソトープの産業利用とその影響

RIの工業利用の中心はこの線源利用である。放射線の透過、吸収、散乱、電離の作用を利用して、上記の如き色々な作業用の放射線測定器が考案され、これが生産に応用され、各作業ともオートメーションと結びつきある程度の技術革新が起りつつある。

イ、ラジオグラフィ

まず金属及び機械工業における線源利用としてはラジオグラフィ (radiography) による非破壊検査がある。RIを利用して「壊さないで」金属材料を検査する方法即ち非破壊検査法は既に実用段階に入った。ラジオグラフィは放射線透過写真検査法とも呼ばれ、われわれがレントゲン写真をとる場合肉と骨が区分してうつされるのと同じ原理である。これは骨と肉とはエックス線の吸収係数が異なるため起るので、肉はエックス線を通すが骨はあまり通さない。例えば熔接部に巣(铸件に生ずる空洞)がある場合、巣の部分は放射線を吸収することなく透過させるが、完全な部分は放射線を吸収する。従ってその背面に放射線を感じるフィルムをおいておけば巣の部分だけ強く放射線を感じる。これに用いる RI は透過力の強いガスマー線種で、 Ra^{226} (ラジウム)・ Tm^{170} (スリウム)・ Co^{60} (コバルト)・ Cs^{137} (セシウム)・ Ir^{192} (イリジウム)等が用いられる。なお

ラジオグラフィー



のは容易に発見できる。以上の方法は機械及び金属工業のみならず、造船、建築工業等において溶接箇所⁽¹⁾の検査又は鑄物の巣の発見に用いられる。

ロ、工業計測器

1、厚み計

放射線の透過、散乱作用の原理が工業計測器に応用されたもの一つとして厚み計 (thickness gauge) がある。われわれが日常用いている紙、プラスチックやゴム製品、ビニール、銅板等を作る工場では均一の厚みのものを製造して製品にム

厚物に対しては Co^{60} 、薄物に対しては Ir^{192} 、その中間のものに対しては Co^{60} が適して

いる。従来は管球電圧数十万Vのエックス線装置が用いられたが、ラジオグラフィーはこ

れと比較すると価格も数%以下であり、移動性に富み、電線を必要とせず、又故障の恐れ

もないので大いに普及しつつある。ただエックス線装置と異なり、常にガンマー線を放射

しているので障害予防の点を考慮する必要がある。若し被検査物が巨大な場合は一々細部

にわたって写真を撮れないからフィルム⁽²⁾の代りにガイガー

計数器やシンチレーション・カウンタを用いて迅速に探

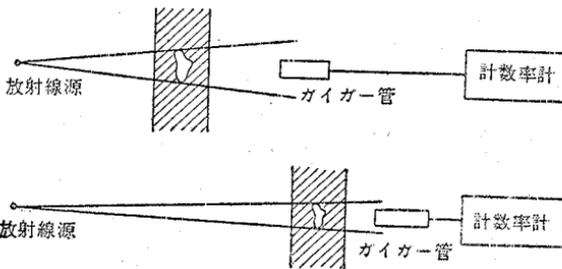
傷する方法が行われている。下図の計数率計とはガイガー

計数器に入る放射線の強さが毎秒どの程度の数のカウント数で

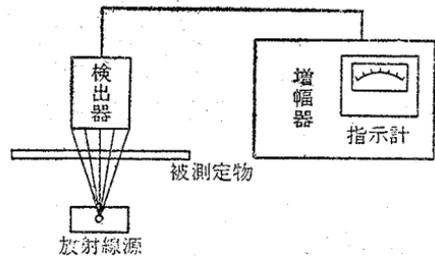
あるかを計器でメーターを直視して放射能の強さを知るこ

とのできる計器である。この探傷法は直径三ミリ程度のもの

ガンマー線による探傷法



透過厚み計



ラをなくすことが品質を向上させる上極めて重要である。厚み計には放射線の透過作用を応用する透過厚み計と散乱作用を応用する散乱厚み計とがある。透過厚み計は被検物に対して放射線源の反対側にガイガー計数管又は電離管を配置し、透過線量を検知して被検物に無接触でメーターに厚みの絶対量又は偏差量を指示させる計測器である。この場合被検物が厚い程透過線量は弱くなる。この方法はゴムやビニールのように接触すればそれだけへこむもの又は煙草の銀紙の如く破れやすいものを測る場合に便利である。使用される ^{90}Sr は厚肉のものにはガンマー線源がよく、ブリキ板や金属箔程度には ^{204}Tl (ストロンチウム) や ^{204}Tl (タリウム) などのベータ線源が好適である。被検物の測定範囲は非常に薄いものにも及び次の如くである。

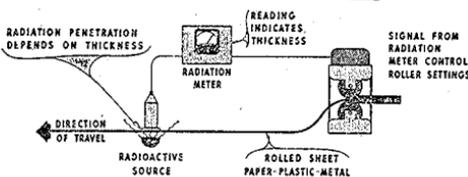
C^{14} (炭素)	銅板	0.025 ミクロン	半紙	0.2 センチメートル
Sr^{90} (ストロンチウム)	〃	0.7 ミリメートル	〃	1 センチメートル
Ru^{106} (ルーチニウム)	〃	1.5 ミリメートル	〃	2 センチメートル
Co^{60} (コバルト)	〃	数十センチメートル	〃	制限なし

しかも測定精度は極めて高く、誤差は測定値に対して±1—2パーセント以内である。

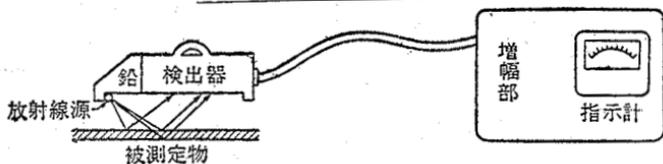
例えば五ミリの銅板を測定し得られる値は四・九九ミリから五・〇一ミリの間にはいる精度をもっている。現在わが国でもゴム工場、鉄板工場、ビニール工場で製造工程中の厚

ラジオ・アイソトープの産業利用とその影響

自動制御化した厚み計



計 厚 乱 散



み計で厚みをはかり、品質向上に大いに役立っている。更に最近では製品の厚みの変化を一定範囲におさめるため、この厚み計を用いて自動制御が考えられている。

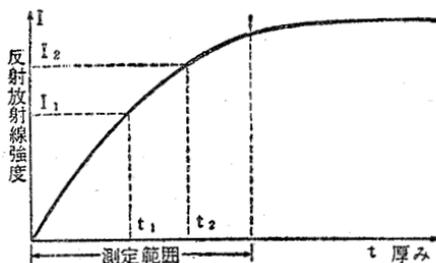
次は散乱厚み計であるが、多くの化学工場のタンクやパイプのように、内部に液体や気体が入っている場合これが利用される。タンクやパイプは年を経ると共に腐蝕し、長い間ほっておくと事故を起す原因となる。散乱厚み計は放射線の散乱作用を利用して、その散乱強度によって物の厚みをはかるもので、線源と検出器は被検物と同じ側におかれる。

使用 RI はガスタンクや化学用容器、修理船などの厚みをはかるのには Co^{60} (コバルト) を用い、 20% 耗以内の鉄板を 5% の精度で測定できる。又ブリキ板の錫メッキ量の測定には軟ベーター線を出す Cu (炭素) を用いて $\pm 2\%$ の精度が得られる。

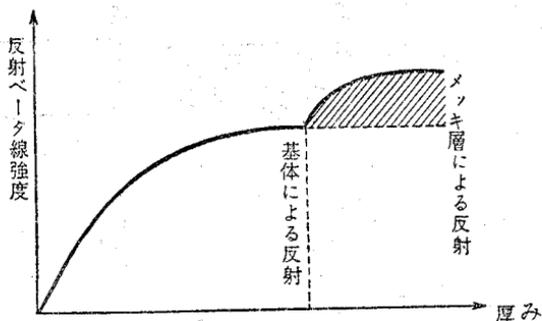
いま被検物の厚みと散乱強度との関係を図であらわすと下の図の如くである。即ち厚みが増すに従って散乱強度は増すが、次第に飽和し、その後は如何に厚みが増しても散乱強度は増さない。この飽和点はその物の測定範囲となる。 Co^{60} (コバルト) を用いた場合、鉄では約 20 ミリメートル、鉛で約 12 ミリメートル、コンクリート約 70 ミリメートル、プラスチック約 50 ミリメートルがそれぞれ測定範囲となっている。

次に特殊な厚み計としてはメッキ厚み計がある。生産工程を連続的に流れている

厚みと散乱強度との関係



メッキ層の厚みと散乱強度との関係



メッキの厚みを無接触ではかるためには、従来の機械的方法では絶対に不可能である。メッキ厚み計の原理はメッキ層のついている側からベータ線を当て、散乱してくるベータ線の強度をはかることによって、メッキの厚みを測定するのである。散乱ベータ線とメッキの厚みの関係は上図の如くであるが基板による散乱ベータ線は電気回路的にうち消され、メッキ層厚みのみを増幅してメーターの指示に表わすようにしてある。

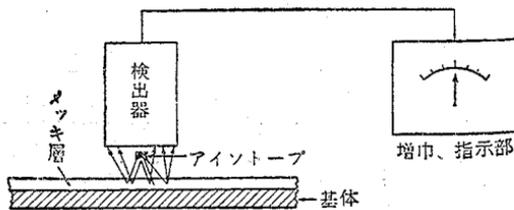
2、液面計

従来密閉されたタンクの内部の液の量を測定するためタンクの横壁にガラスU字管をつける方法が用いられた。しかし液がネバッていたり、内部が高圧、高温の場合或いは逆に低温の場合このようなガラス管を横壁にとりつけることはできない。そこでガンマー線の透過作用を応用する液面計が考えられた。液面計には次の三つの考え方がある。(1) 液面に放射線源を浮かし、タンクの上部に検出器を

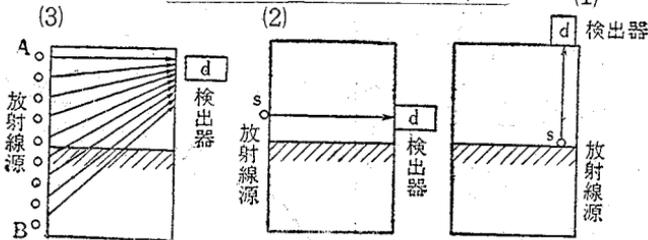
固定して測定する方法。この方法によると液面が上下することによって、線源と検出器との距離(s—d間)が変化する。放射線の強度は距離の自乗に逆比例するから、強度を測定することにより、検出器と放射線間の距離を逆算することができる。(2) 次は液面に線源を浮かすことができない場合で、線源と検出器をタンクをはさんでそれぞ

ラジオ・アイントロップの産業利用とその影響

メッキ厚み計



液 面 計 (1)

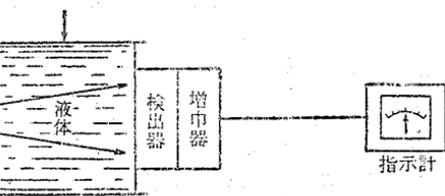


3、濃 度 計

化学工業や薬品工業で、工程中のある箇所では液体の濃度を一定に保っておく必要がある場合がある。その場合少しサンプルを抽出して分析したり容量で濃度をはかたりす

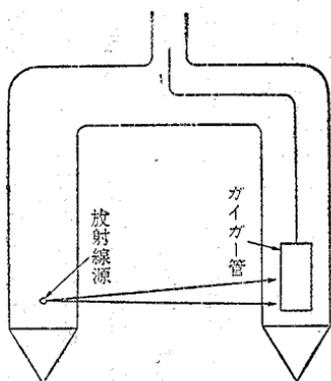
れ反対側におき、液面が放射線源 s と検出器 d を結ぶ線 ($s-d$ 線) を越えるかどうかを知る方法である。上図の如く液面が $s-d$ 線を越えた場合は放射線は液のため吸収されるので急激に減少する。若しこの装置を上中下の三段につけておくと自動制御ができる。即ち液が下段にくれば液の供給弁に自然に開き、液が上段にくれば自然に排出弁が開き中段まで下げる操作ができる。(3) 第三は液の変動が非常に広範囲にわたって、しかも非常に速く変動する場合に、常時液の様子を監視する方法である。この場合タンクの片側に適当に放射線源を分散しておき、反対側に検出器をおき、検出器に感ずる放射線強度が液面の高さ按比例するようにしておく。したがって、検出器に感じた放射線強度と液面の関係を、そのままメーターに表わしたならば、液面の高さの絶対値が直読できるわけである。

濃 度 計



液面計に用いられる RI は Co_{60} が多く、その量はタンクの大きさ、壁の厚さによって決定される。⁽¹³⁾

泥 密 度 計



ラジオ・アイソトープの産業利用とその影響

るのは時間がかかる。ところが放射線を用いると、外部から中の液体の濃度を知ることができ、濃度計の出力を用いて原料の供給排出量を調節することにより自動的に一定の濃度とする所謂オートメーション化することもできる。原理は厚み計と同じであるが、ただ厚み計と異なっている点は、放射線が通過する距離が自由に選べる点で、このため途中にある流体のわずかな比重の差も長い距離で集積されて最後には大きな出力の差となる。これに使用される RI は検査する物質の濃度によって異なるが、 ^{60}Co (ストロンチウム)、 ^{137}Cs (セシウム)、 ^{60}Co (コバルト) などが用いられている。また濃度を知ることにより、一定時間に通過した流量を計算することができ、原料管理の面からも濃度測定は有益である。

4、泥 密 度 計

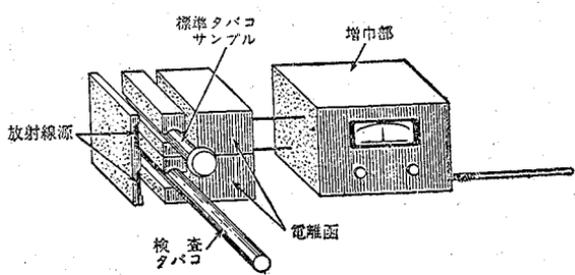
港湾を建設する場合、海底の状態即ち砂地か岩盤か泥か、その密度等は最も重要なことである。又河川の泥土は農業上重要である。放射線を利用してこれらの泥

土の密度を測定するものが泥密度計である。上の図の如く一方に線源を他方にガイガー計数管を入れ、その間に入った泥のガンマー線の吸収係数を測定することによってその密度、土質及び水分の割合等をはかることができる。

5、充 填 計

充填計というのは中味のつまり具合を

煙 草 充 填 計



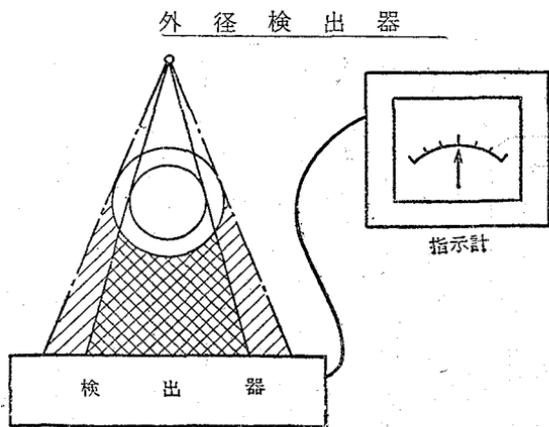
連続的に検出する計器で、例えば煙草などのつまり具合を検査するのに用いられる。煙草充填計の場合は前頁の図の如く二つの穴の一方に規準物を入れ、他方に製造過程のものを流れ込み式に入れる。そうして両方同じ強度の放射線を当て、それぞれ別々の電離函で煙草によって吸収され、なお透過してきた放射線を受ける。若し両方の煙草のつまり方が同じであれば電離函の受ける放射線の強度も同じで、この場合メーターの針は中央をさすようにする。若し差がある場合は放射線強度にも差を生ずるから、その差を増幅してメーターに示すようにする。充填計は煙草のみならず、菓子、缶詰、その他にも応用される。⁽¹⁵⁾

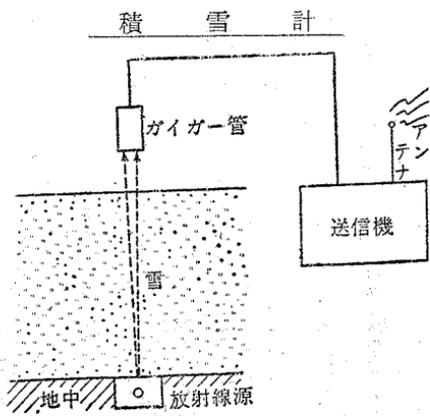
6、外径検出器

外径検出器というのは放射線で影をはかることにより、物体の大きさ、面積を測定する計器である。その原理はガンマー線とか低エネルギーのベータ線のよう透過力の弱い放射線を物体に当て、それによってさえぎられた部分の面積を測定して、物体の大きさを比べるのである。上図の如くパイプの直径をはかる場合、その直径は放射線強度と逆比例する。即ち直径の大なるに従って放射線強度は弱く感ずる。この方法はパイプのみならず電線の径をはかたりする場合にも用いられる。⁽¹⁶⁾

7、積雪計

北海道、東北、信州の山奥に雪がどれだけあるかということとは雪溶け期の発電量にとって極めて重要である。即ち発電計画をたてるためには正確に積雪量を知る必要がある。積雪計は放射線を利用することにより、即





ち積雪が放射線を吸収する度合によりその積雪量を測定する計器である。この場合積雪計が感じた出力は無線の信号に変えて、一定時間毎に山麓の電力会社の事務所まで送るロボット積雪計となる。⁽¹⁸⁾

8、静電気測定器

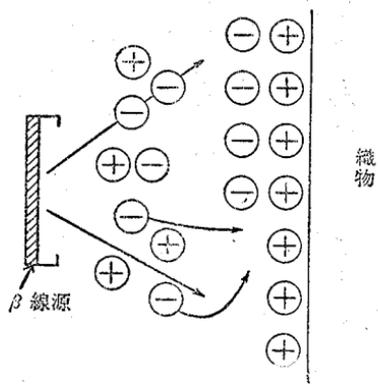
製紙工場、印刷工場、織物工場等において、摩擦によって静電気が発生することは、工場の安全や操業上に好ましくない影響を与える。この静電気の測定に RT を利用した静電気量測定器が用いられ、また静電気を除去するためにも Si_{100} (ストロンチウム)、 Th_{230} (タリウム) などが使用される。これらは放射線の電離作用で気体がイオン化することを

利用したものである。即ち正の電気がたまった織物や紙にベータ線を当てるとベータ線は周囲の電気を電離するが、その中の負の電気を帯びた気体が、織物や紙の正の電気と一緒に電気を中和してしまうのである。このようなことを静電気除去と呼んでいる。

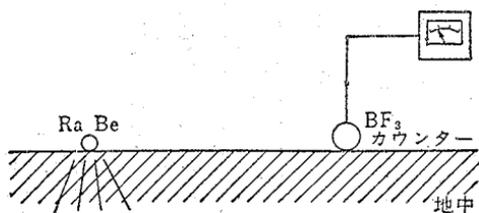
放射線源利用には以上のアルファ線、ベータ線、ガンマ線を利用する工業計測器の外に中性子線を利用するものがある。中性子が水素原子にぶつかった場合エネルギーを相手に与え自分はエネルギーを失う。これを緩速化 (slow down) という。この性質を利用して土中の水分検

ラジオ・アイソトープの産業利用とその影響

静電除去の原理



中性子による水分測定



査に用い農業、土木上極めて有益な成果を収めている。即ちラジウムを金属ベリウムと混ぜると、速い中性子 (fast neutron) が放出されるが、この中性子線を土の表面におくと、中性子は土中の水素原子によって緩速化される。中性子検出用の計数器である BF₃ カウンターにより土中の水分が多ければ検出される中性子量は多となり、水分が少いと中性子量は少くなる。又中性子と衝突してはねとばされる水素原子は反跳原子と呼ばれ、正の電荷をもっている。この性質を利用して金属面の油膜の厚さを測定するの(5)に利用される。

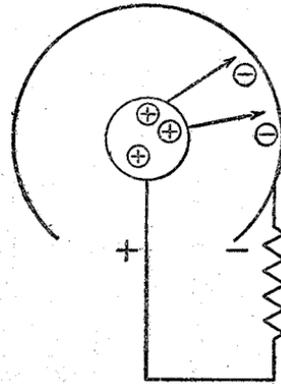
更に放射線源利用としては石油製品の化学分析即ち硫黄や水素の迅速正確な定量法としてひろく利用されている。又ガソリン中の四エチル鉛の迅速分析にも応用されている。硫黄の定量法としてエックス線吸収法は既によく知られているが、このエックス線源として Fe⁵⁵ (鉄) を使用する装置及び分析法がある。これによると測定時間は五分で分析精度は高い。又炭化水素中の水素の定量法は、水素によるベーター線吸収の特異性を利用したものである。ベーター線源として Sr⁹⁰ を使用する装置及び分析法が研究されている。既に Cenco ベーター線 H/C メーターとして製造販売されているものは測定時間五分、分析精度 ± 0.1% で優秀である。

石炭工業における線源利用としては石炭の採掘、調製加工の面において RI を利用する技術が各国で研究され、そのあるものは実作業に應用されている。ソ連においては炭坑やコークス工場で石炭運搬管理として、炭車の実車と空車の区別に放射線の吸収作用が應用されている。この吸収法は袋入炭の詰込率、カサ比重の測定、ブリケット密度の測定に應用されている。又放射線の透過する物質の厚さと密度を一定にしておいて、放射線の吸収から、

その物質の化学的組成を求めることができるので、これを利用して石灰分の迅速測定も可能であり、これはベルトコンベアの上を流れる石炭の灰分測定に応用できる。更にこれを計器の指示系統と連絡させて、ベルトコンベア上の石炭を二つの方向に取り出すようにして全く自動選定ができる。²⁰⁾

このようにして RI を線源として利用し、石炭鉱業のオーメーイションを進める可能性は極めて大きいといわれ

直接充電法による
原子力電池



ている。以上は線源利用の工程管理であるが、石炭の採掘、保安、選炭、加工の面での研究手段として RI は利用されている。即ち鉱山漏水調査、炭層中のメタン流動状態調査、坑内通気におけるガスや炭塵の放射状態調査等にも利用されている。

電気工業における線源利用としては放射線の電離作用を応用して、各種放電機器が作られ、また風速計や気圧計、静電気測定器や除電器としても利用されている。更に蛍光体にて

対する蛍光作用は、例えば特殊の標準光源や標準灯として利用される。又放射

線エネルギーは電気エネルギーに変換して

利用することができる。原子力電池はアメ

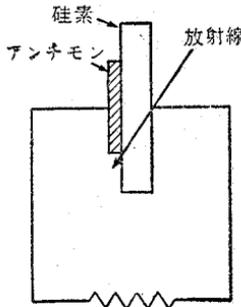
リカでもまたその開発は緒についたばかり

であるが、色々な方法で電気を発生させる

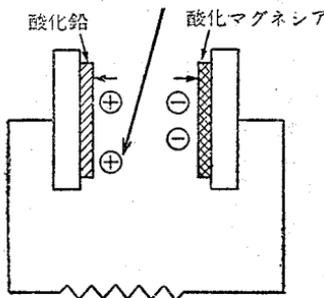
ことが考えられている。その代表的なもの

を二三あげると、その第一は直接充電法と

電極法による原子力電池



半導体による原子力電池



いわれるもので、中央にベーター線の放射線源をおくと、ベーター線は陰電気をおびてとび出し、外側の容器に附着する。そのため中央は正に、外側は負に帯電され、数十万ボルトになることがある。この両者の間を線でつなくと電気が流れるわけである。第二は電極法による原子力電池で、三重水素などの放射性ガスを含んだアルゴンなどの気体をつめておくと、放射線によって内部ガスが盛んに電離されて、電極の表面状況によって陰陽に分かれ、外部電線を通じて電流となつて流れる方法で、この方法はだいぶ実用化されている。第三は半導体整流器を用いた原子力電池で、トランジスタなどに使用されている Ge (ゲルマニウム) や、Si (硅素) などが用いられている。即ち硅素の上に Sb (アンチモン) を接合すると、その接合面は一方的にのみ電流が流れる。これは一方側では自由に動ける電子が欠乏しているからであるが、放射線が通過すると原子核のまわりに吸収束縛されている電子がたたかれて自由に動けるようになり、自由電子が増加充満してくる。このため外部に電線をつなぐと、この電子が流てくるわけである。この形式のものが一番実用性がある。⁽²¹⁾

(三) 照射利用

ある物質に高エネルギー放射線を大量照射するとその物理的、化学的性質に著しい変化を及ぼすものがある。そういう変化を利用する方法が照射利用である。高分子化合物、低分子有機化合物及び生体細胞などがこれで、この変化は放射線のエネルギーによる励起、イオン化によるものといわれ、従来の方法では実現できない効果が得られる。

照射利用は各産業に応用され照射工業という一つの新しい工業を勃興せしめている、これを産業別に見て行く
と次の如くである。

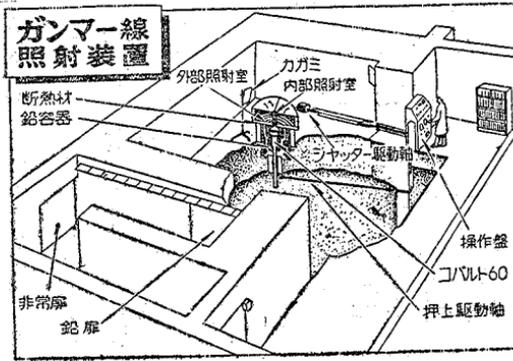
まず食品工業における照射利用から述べると、RI の中主としてガンマー線を用い、(1) Cold sterilization and

延長せしめる方法である。この二つの方法はアメリカにおいて盛んに研究されており、現在一日一、〇〇〇屯の食料を照射する工場が建造中であり、この工場が完成されれば、食料は冷蔵設備なしに長期保存することができるようになり、食料の保存、配給に革命を起すであろう。アメリカでは Atoms revolutionize food industry というのがいわれている。又ソ連においても食品工業における照射利用はソ連科学アカデミー生物物理学研究所及び全連邦穀物科学研究所の指導の下に盛んに研究が行われている。これらの方法の利点は照射殺菌された食品はガンマー線の照射を受けるのみで、PI と直接接触は行われないので食品に放射能が附着したりすることは絶対になく、又有害な物質が生成したという事実もない。ただ缶詰について加熱に伴う変化が起ると同様に、ガンマー線の大線量照射に伴い、味、香、栄養素、組織などに好ましからざる変化を起す食品群が一部存在することが判明している。

しかしその変化を可及的に阻止する研究が進められ年々その成果を収めつつあるので将来完全に阻止できると思われる。第二の害虫駆除であるが、食品に含まれている有毒な生物、例えば牛肉中の真田虫、豚肉中の旋毛虫、淡水魚中のシストマ類、野菜の蛔虫などの人体寄生虫及び穀類の害虫例えば穀象虫などがガンマー線によって死滅することができ。即ち寄生虫のない獣魚肉は食品衛生上重要であり、又穀物貯蔵中に起る虫害による損失は年々莫大であるので、この方法は影響するところが大である。第三は人工冬眠法で、玉葱、馬鈴薯など貯蔵中に発芽が腐敗或いは毒素形成などの悪変化を起し、食用不能に陥る恐れのある食品に対して、ガンマー線を照射して発芽酵素を阻害せしめる。この方法は根菜類などの重要蔬菜にも応用できる。⁽²²⁾

照射利用が最も有効に利用されている部門は紡績、化繊、化学工業などの高分子工業である。高分子物質とは普通の分子よりも桁違いに分子量の多い分子のことをいう。普通の分子の分子量は千以下で、これは低分子と呼ばれる。高分子は沢山の分子が化学的に連絡して（これを重合という）できたもので一万以上の分子量をもっている。

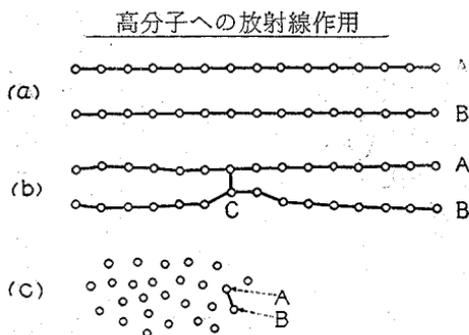
ゴム、ナイロン、ビニール、プラスチック、セルロース、ペークライト等が高分子物質で、物理的にも化学的にも安定しているので器具、衣服などの素材に適している。天然にある高分子はゴム、セルロース、澱粉、蛋白質で、これを用いて合成高分子物質を作る研究が各国で行われた。最初にできた合成高分子物質はペークライト（一九三〇年）で、その後ナイロン（一九三四年）ができた。従来合成高分子物質を作る方法は（1）温度を加える方法、（2）圧力を加える方法、（3）触媒による方法等があった。この三つの方法はそれぞれ欠点をもっていて、でき上った合成物質の性質を低下せしめた。そこへ登場してきたのは放射線照射による方法で、この方法によって今迄の合成物質になかった新しい性質をもった合成物質ができるようになった。放射線



ラジオ・アイソトープの産業利用とその影響

で新しい高分子物質ができる過程はまず原子に放射線をあてると電子がそのエネルギーによってはじき出されたり、飛びこんできたりして原子が非常に不安定な状態になる。そこで早く安定しようとして、互につながりあって分子量の大きい新しい高分子物質ができるのである。今迄の温度、圧力、触媒による方法も同じ変化を経て高分子物質が作られていたのであるが、放射線にくらべて遙かにエネルギーが少ないから（数電子ボルト）粒子一個当たり百万電子ボルトという高エネルギー放射線の方が何万倍も大きな作用をする。外国には一九五二年頃より放射線高分子研究所が設けられて新しい放射線の照射方法とかそれによって生ずる反応などの研究が行われてきたが、日本では三一年一月始めに紡績、化繊、化学工業など高分子工業に関係をもつ八七社が協同して財団法人日本放射線高分子協会という組織を設け、その研究所が三三年五月一五日大

阪府下京阪香里にできた。現在では一万七千坪の敷地に四百坪の研究実験室が完成、アメリカより輸入された東海村につぐわが国第二のファンデグラフ静電加速機、千キュリーの ^{60}Co ガンマー線照射装置(前頁図参照)、日本では数少ない質量分析計、常磁性共鳴吸収装置などの高分子研究の最先端の機械がそなえつけられている。

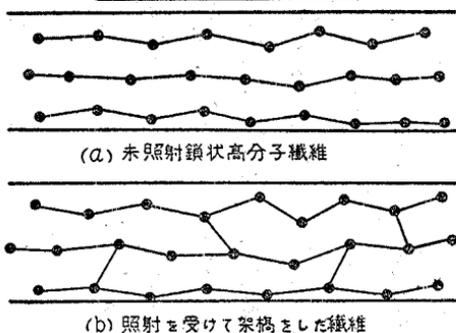


った繊維製品(鎖状高分子製品)に対して反射線を照射すると、分子の励起及びイオン化以外に原子の結合が切れ遊離し易い原子が逸脱して相隣する二つの分子間に再結合を起し架橋する反応を生ぜしめる。これを図解すると次頁の図の如くである。

繊維のような高分子物に対する放射線の照射は、強力の上昇の外に融点、軟化点の上昇、溶剤に対する不溶化な

織維工業における照射利用は広範囲に行われている。まず織維原料に放射線を照射すると低温重合が可能となり強度が向上する。上図(a)に示す如くA及びBの二個の高分子があるとす。それぞれの分子は数千又は幾万の原子より構成されているとする。この二つの分子は互に自由独立に運動することができ、これに今一個の放射線粒子或いは量子が作用して(b)に示す如くAB間に結合ができるとする。この結合が唯一個であってもAとBとが結合された後は二個の分子は最早自由運動ができなくなり、分子量も二倍となり、この結合分子よりできている材料の性質は甚だ異ったものとなる。(c)は低分子の集合体であるが、この場合二個の分子が結合したとしてもその影響は非常に小さい。即ち高分子の場合の一個の放射線粒子或いは量子の効果は低分子集合物の数千乃至数万倍に匹敵する、これが放射線の高分子材料である繊維の性質を変える原理である。又、すでにでき

高分子の架橋結合



どの効果をもたらしている。又染色性で難点があるとされているテリレン、オリロンなどの合成繊維に対してはその染色性を改善し、繊維の撥水性、耐皺性、湿潤強力などを向上させる。⁽²³⁾

繊維工業における照射利用も研究実験段階から実用段階に入った。わが国においても東洋レーヨン、東洋紡績などのメーカーは Co^{60} 数百キュリーの照射実験室の建設を行い、化繊協会でも、業界より資金を集め、大線量照射装置ファン・デ・グラフ加速器などを備えた大規模な共同実験室建設を計画している。特に東洋レーヨンでは最近繊維の強化、品質向上を図るため、滋賀県の同社中央研究所に高エネルギー放射線を発生するファン・デ・グラフ型電子加速器を設置すると共に、「放射線総合研究室」を設けた。このファン・デ・グラフ型電子加速器は東芝製国産第一号で、従来の Co^{60} 照射による品質検査に比

べて、今度の本機導入は (1) 今までの Co^{60} 照射実験は間接的な利用のため、あきたらないので、化繊、合繊の品質改良をねらうため電子加速器を使う必要がある。(2) 同機の利用により (a) ナイロン系に照射し、これまでのナイロンの欠点である耐熱性や吸湿性を変化せしめ (b) 重合、紡糸の技術改良に革命的效果をもたらし、(c) 新合繊のテトロン (羊毛代用) の欠点とみられる染色性を改善する等化繊、合繊の品質改善に貢献している。従ってこの際三千万円の投資は将来の品質改善を考えれば十分採算がとれると考えられている。

化学工業に対する照射利用も各方面において研究されている。アメリカ G・E 社はポリエチレンに高速電子線を照射することによってポリエチレンの品質を改善し Irrathene という商品名で販売している。ポリエチレンは従来

ノリつけは不可能と考えられていたが、最近では放射線によってノリつけができるようになった。又普通のポリエチレンは七〇度(C)の温度で軟化してしまいが、放射線で照射して改良されたポリエチレンは三〇〇度近くの高温にも耐えることができる。化学工業の中で最も有望視されているのは合成樹脂工業で、その重合と改質について薬剤石油の分解、炭化水素の塩素化、原子炉による空中窒素の固定化などが考えられて企業化に対する現実的努力が行われている。ゴム工業においてはゴムも一種の高分子物として照射が合成ゴム原料の合成から、ゴム自身の架橋結合による硫黄を使用しない加硫に利用される可能性が多い。アメリカでは照射加硫されたシリコンゴムの市販が近いと発表されている。一般にガンマー線で加硫したゴムは化学的加硫ゴムに比べて溶剤に侵されることが少い。

電気工業における照射利用としてはガンマー線の照射によるトランジスタの特性改善、各種回路部品に放射線を照射した場合抵抗類は抵抗値を増加し、乾電池類では内部抵抗が増加すること等が挙げられる。また高分子化合物に対してはその電気的性質やその他の物理的性質の変化が利用され、今後電気絶縁材料の発達に大いに役立つものと考えられる。

金属及び機械工業においては、放射線を照射して金属材料に種々の格子欠陥を生ぜしめ、その物理的性質を調べることによって金属材料の物性論的研究に貢献せしめることができる。他方原子炉材料としての金属材料は放射線照射により金属の電気抵抗、硬度、クリープ、引張及び衝撃強度、弾生率の変化を初めその他多くの物理量の変化が測定されている。

農業部門における照射利用としては品種改良のために植物の種子などにベータ線、ガンマー線や中性子線を照射して突然変異を起させ、その中から利用価値の高い品種を選び出す方法が用いられている。日本ではRIの中で

ベーター線を出す磷³²Sのように半減期が短かく、植物に吸収され易いものを用いて種子のときか又は生長の初期に吸収させて品種改良が行われている。アメリカ及び諸外国ではガンマー線を出す⁶⁰Coが用いられ、ガンマー・フィルターと呼ばれる広い圃場の中央にRaニキロに相当する⁶⁰Coをおき、これを囲んで植物を栽培し、ガンマー線を作物に照射している。このような方法で新しい品種が数多く得られ、アメリカ及び歐洲の各国では、小麦については多収のもののほか短稈、耐病性、強稈、早生、密粒などが得られており、燕麥では短稈、長稈、早生、耐病性などが得られている。とうもろこしについても耐病性、稈長、早晩性に関して有望な変異が得られ、麻も種子の多いもの、莢数の多いもの、茎葉重の多いものなどが得られている。

1、詳細な点については、西垣、亀高、佐伯「農・畜および水産への利用」原子力工業、一九五七、四月号、二二—二五頁
2、なおその二三の例をあげれば (1) ⁶⁵Seを用いて溶鉄の脱硫反応の機構が解明され、脱硫に対して有効な方法が確立された。

(2) ⁶⁵Seを用いて融鉄を塩基法スラグ間の平衡におけるPの分配あるいは塩基性平炉の脱磷過程が正確に知られた。(3) ⁶⁵Caを用いて脱硫、脱酸の機構におけるCaの役割、あるいはスラグ中のCa拡散速度をオートラジオグラフにより求められた。(4) また⁶⁵Feにより熔鉄とスラグ間における鉄の移動速度、⁶⁵Cuにより熔鉄中の炭素の拡散速度を測定した研究がある。(5) その他では炉内ガスや熔鉄の流れや炉材の侵蝕及びそれに帰因する鋼塊への非金属の混入なども測定されている。

3、非鉄製錬においても各方面にわたり、即ち(1) ¹³⁵Sb、⁶⁰Co、⁶⁵Geを用いて鉛電解液中の不純物の除去、(2) ¹¹⁰Agを用いて銅の電解製錬における銅陽極中の微量の銀の動静、(3) 天然の¹¹³Inを用いて鉛蓄電池の電解機構の究明についてなどのほか、溶液よりの金属析出に沈澱剤を入れる効果、製錬における触媒による反応の促進度、針石の焙焼機構の研究など各面に亘っている。そのRIのトレーサー利用は金属加工、表面処理、摩擦摩耗、潤滑の研究などに用いられている。即ちAlの連続鑄造における凝固面の検出のためCu(銅)、Au(金)を加えて鑄造して後原子炉中で放射線を与え、オートラジオグラフで検出している。又⁶⁵Feを添加した鋼のオートラジオグラフによってPの偏析の様相と鑄造後の偏析除去ラジオ・アイソトープの産業利用とその影響

の効果を測定する等枚挙に暇かないなどである。

なお詳細は富士岳「金属および機械工業への利用」原子力工業、一九五七、四月号参照

- 4、内田章五「化学工業への利用」原子力工業、一九五七、四月号、三三—三五頁
- 5、牧野直文「電気工業への利用」原子力工業、一九五七、四月号、一六—一七頁
- 6、大西俊次「繊維工業への利用」原子力工業、一九五七、四月号、一八—二〇頁
- 7、Bradford J. R., Radiosotopes in Industry, 1953, pp. 16—17
- 8、星野・一条「 β の地質調査及び選鉱製錬への利用」原子力工業、一九五七、五月号、二八—三二頁
- 9、原子力講座「同位元素とその応用」上掲書第四二頁
- 10、シンチレーション・カウンタとは一種の感度のよい放射線測定器である。放射線が Zn (沃度ナトリウム) という無機物の結晶に入った場合、結晶は光を発する。その光を光電二次電子増倍管という特殊の真空管に入れると電子が発生し、何万倍かに増幅された出力となって表われる。シンチレーション・カウンタが如何にすぐれているか(分離能がよいか)を示すと二つの放射線の時間間隔が一〇〇万分の一〜五秒以上ならば、二個を完全に分離して計数できる。これに対してガイガー計数器は一万分の二秒以上でなければ分離できない。
- 11、富士岳「上掲論文」第一四頁
- 12、原子力講座「上掲書」第五三頁
- 13、14、15、16、17、18、原子力講座「上掲書」第五四—五六頁
- 19、雨宮登三「石油および石炭工業への利用」、原子力工業、一九五七、四月号、第一—一三頁
- 20、原子力講座「上掲書」第七二—七三頁
- 21、小原哲二郎「食品工業への利用」原子力工業、一九五七、四月号

渡辺渉「放射線による食品の殺菌及び貯蔵」原子力工業、一九五七、三月号

石井浩「食料品工業へのR₂の利用—ソ連の現状」原子力工業、一九五七、七月号

22、岸直行「高分子工業への放射線利用」原子力工業、一九五八、七月号

沖敏行「R₂を繊維の製造に利用する」原子力工業、一九五七、八月号

四 結論——技術革新と経済成長

R₁の工業利用は原子エネルギーの利用と共に産業経済における一つの偉大なる技術革新である。昭和三十一年通産省は、戦後十年を経過したわが国の鉱工業技術の現状をあきらかにする目的で「技術白書」を公表し、その序文の中で「経済の発展をはかるためには、その基礎として技術の進歩が必要であることは申すまでもない」と述べている。およそ一切の技術革新は経済にとって生産技術を増進させ、生産力を高め、経済余剰をつくる。即ち技術革新は一定の生産を得るための費用を最小にするか、又は一定の費用をもって最大の生産を得せしめることによって経済の成長に寄与する。

過去の歴史を繙いてみても経済成長が数次の技術革新によって飛躍的にもたらされてきたことは明らかである。即ち蒸気機関の発明（一七八八）に始まる第一次産業革命後三〇年乃至四〇年間経済は大いに成長し景気は上昇した。一九世紀の始め蒸気力が交通機関に応用され、その後三〇年間更に経済の拡大発展が行われた。又十九世紀の終りから一九二〇年までの内燃機関と電力が産業に応用され、その結果その後三〇年間経済は更に一層拡大発展した。特に内燃機関の採用は自動車工業の長足な進歩をもたらすと共に、これが関連工業として鉄鋼業及びゴム工業の拡大発展を助長し、給油所、修理工場等の全国網が自動車路線に沿って現われた。更に自動車運輸の発展は自動

車道建設工事を促進せしめ、人口の分布と都市と郊外との関係を変容せしめ、広汎な雇傭と投資の機会が新らし造くり出された。また内燃機関はひとり自動車のみならず他の交通機関にも採用せられ殆んど同じ影響をその関連産業に与えた。

Alvin H. Hansen 教授は有名なコンドラチェフの統計的研究によって景気の長期波動を次の如くみた。

繁栄時代

困難時代

一七八七—一八一五
一八四三—一八七三
一八九七—一九二〇

一八一五—一八四三
一八七三—一八九七
一九二〇—?

コンドラチェフによると繁栄時代は景気上昇期であり、困難時代は景気下降期であり、それぞれの時代の始期と終期は五〜七年の幅をもつ期間とみた。第一の長期波動の上昇は産業革命の発生によって、第二のそれは鉄道汽船の普及によって、第三のそれは、電気、化学及び自動工業の出現によつてもたらされたとみるべきである。

アメリカ大統領の経済報告の中にアメリカ経済の繁栄を支える一三の理由があげられているが、その三番目と四番目の理由は次の如くである。即ち (3) 怒濤の如き技術の発展、(4) 技術の発明による急速な設備の取替え。

現在放射性同位元素は各産業のあらゆる段階に亘り利用され、これは更に自動制御 (オートメイション) と結びつき一つの技術革新を引きおこしつつある。この技術革新は今後十年間に経済産業に重大な影響を与え、これによつて経済を動脈硬化より防ぐと共に新しい産業——原子力産業を勃興発達せしめるであろう。通産省編「技術白書」の中においても「原子力の解放はその行手に新たな産業革命の到来さえ予想され、来るべき時代における最大の技術たるは疑いをいれないところであろう」と述べられている。¹⁾

次に技術革新と経済成長との関連をみると次の二つのことがいえる。(1) 技術革新が経済成長へ与える影響は加速度原則による。(2) 技術革新が経済成長へ与える影響はこれを時間的に分析してみる必要がある。

まず一般に技術革新は経済の発達に対して加速度的に作用すると考えられる。それは手段が常に新しき手段獲得の手段となるからである。技術革新が経済成長にもたらす影響の加速度原則は a の変化が生じたとすれば、 a が手段として次の変化を引起す力があるとき、次に生ずる b の変化はその度を高めることを意味する。

第二は技術革新が経済成長へ与える影響はこれを時間的に分けて観察する必要がある。Schumpeter 教授はこれを二つの時期に分ち、最初の期間は懐妊期間 (period of gestation) と呼び、技術革新はそれが出現した分野における生産の増加をもたらすよりは、むしろ生産要素に対する需要を喚起して、この方面から経済に影響を及ぼす。しかる後生産の増大が徐々に現われてくる。彼は後者の時期を顕現期間 (period of operation) と呼んでいる。かように技術革新は最初は生産要素に対する需要喚起より始まり徐々に産出増大という結果に達するのである。上記のコンドラチエフによる長期波動の上昇期は主として Schumpeter 教授のいう技術革新の顕現期間でなくむしろ懐妊期間であるということは興味深い問題である。⁽²⁾ Esey D. Donar はこれを経済成長過程において次の如く説明している。

即ち
需要の側 (国民所得の増加)

投資増加分 \times 投資乗数

供給の側 (生産能力の増加)
投資 \times 生産力係数

経済の拡大均衡にはこの基本方程式の両辺が均等に増大しなければならない。しかし技術革新の懐妊期間においては投資増加分 \times 投資乗数 \vee 投資 \times 生産力係数となるため景気は上昇し、顕現期間には投資増加分 \times 投資乗数 \wedge 投資

ラジオ・アイソトープの産業利用とその影響

×生産力係数となるため有効需要の不足が生じ経済の伸長に伸び悩みを生ずる。

現在の原子力とオートメイションによる第四の技術革新は今後一〇—一五年が懐妊期間でこの期間に経済成長に重大な影響を与えることは疑いの余地がないところである。

1、通産省「技術白書」昭和三十一年一月第三九三頁

2、J・A・シユンペーター「経済発展の理論」(中山・東畑共訳)第三頁

経済企画庁調査課編「技術革新と企業経営」

星野芳郎「技術革新の根本問題」

星野芳郎「技術革新」

生産性講座「生産性と技術革新」