アルミニウムの放射化分析 (その4)

小林 昌 敏*

Activation Analysis of Aluminium (part 4)

KOBAYASHI Masatoshi*

7.4 (n, γ) 反応以外の核反応による非破壊的な放射化分析

アルミニウムおよびその合金の成分元素や不純物元素のうち比較的原子番号の低い、いわゆる軽い元素の放射化分析を行なうには (n, γ) 反応以外の核反応を用いることが多い。

このような元素としては B, Be, Li, C, N, O, Mg, S などがあり、これらは速中性子、重陽子、陽子、X線などによる核反応のいずれか1つ、もしくはそのいくつかを用いて定量できることはすでに説明したとおりである。

熱中性子以外の反応ではターゲット元素の種類によって核反応のしきい値がきまつており、ある特定の元素の放射化分析を行なうには利用しようとする核反応のしきい値よりも大きな衝撃エネルギーを与えなければならない。一方他の元素によって行なわれる核反応のために生成する放射能を少なくするためには、これらの核反応のしきい値よりも小さな衝撃エネルギーを用いるか、もしくはこれらの核反応の断面積ができるだけ小さくなるような衝撃エネルギーを用いなければならない。

7.4.1 核反応のしきい値の選び方

第22図は ^{12}C , ^{16}O および ^{14}N の核種をターゲット核として高エネルギーのX線で衝撃した場合に行なわれる (γ , n) 反応の励起関数を示すもので、よこ軸にはX線の衝撃エネルギーをとり、たて軸には核反応の断面積 σ をミリ・バーン(mb) の単位で示している。

$^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$ の核反応のしきい値は15.605MeV、断面積が最大となる衝撃エネルギー E_m は22.5MeVであつて、 E_m における断面積 σ_m は7.7mb (他の文献による。この図では $\sim 11\text{mb}$ となつてゐる) である。この反応で生成する ^{15}O は半減期2.1mの β^+ 放射体であり、 β^+ 粒子のアニヒレーションによつて放出される0.51MeVの γ 線を測定することができる。

$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$ の核反応のしきい値は18.728MeV, E_m

は22MeV, σ_m 8.6mbであつて、存在比98.892%の ^{12}C から半減期20.4mの ^{11}C ができる。

一方 $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$ の核反応のしきい値は10.549MeV, E_m 22MeV, σ_m 15.3mbであつて、存在比99.635%の ^{14}N から半減期10.05mの ^{13}N を生成する。

そこで試料中に酸素、チツ素、炭素が同時に存在する場合に、10.549MeV $\sim$ 15.605MeVのエネルギーをもつX線で衝撃を行なえば $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$ の核反応だけがおこるので他の元素の妨害をうけることなくチツ素の定量を行なうことができる。

15.605MeV $\sim$ 18.727MeVのエネルギーをもつX線で衝撃を行なうと $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$ および $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$ の核反応が行なわれる。この場合チツ素に対して酸素の量が多ければ酸素の定量を行なうことができる。

X線のエネルギーが18.728MeV以上になると $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$ の核反応も行なわれるので、炭素に対してチツ素および酸素の存在量が少ない場合には炭素の定量を行なうことができる。

S. Mayの研究では黒鉛中の酸素を定量するのに (γ , n) 反応を利用し、黒鉛中に存在する 5×10^{-5} 程度の酸素を定量することができた。

7.4.2 酸素の放射化分析

本稿の(その1)(軽金属 Vol. 14, No. 1 (No. 63) Jan. 1964, p. 60 (58)) の第1表に示すように天然の酸素には ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O の3種類の同位体が含まれており、このうち ^{18}O の (n , γ) 反応によつて ^{19}O (半減期29.4s) が得られるが、(n , γ) 反応では試料中に存在する他の元素から生成する放射性核種の放射能のために ^{19}O の放射能測定が妨害されることが多く、また ^{18}O の存在比(0.2039%) および反応断面積(0.2barn) がいずれも小さいため普通 $^{18}\text{O}(n, \gamma)^{19}\text{O}$ という核反応を利用する放射化分析は行なわれない。

酸素の放射化分析に利用される核反応にはさきにのべ

* 東京都立アイソトープ総合研究所 主任研究員 Senior Research Member, Tokyo Metropolitan Isotope Centre.

第13表 酸素の放射化分析に利用される核反応の性質

ターゲット核種	存在比 θ (%)	核反応の種類	しきい値(MeV)	反応断面積 または収率	生成核の半減期
^{16}O	99.758	$^{16}\text{O} (t, n) ^{18}\text{F}$	15.6 9.6	22.5mb 50 mb $5 \times 10^3 \mu\text{c}/\mu\text{Ah}$	112m
		$^{16}\text{O} (\gamma, n) ^{16}\text{O}$			2.1m
		$^{16}\text{O} (n, p) ^{16}\text{N}$			7.4 s
		$^{16}\text{O} (d, n) ^{17}\text{F}$			1.1m
		$^{16}\text{O} (\alpha, pn) ^{18}\text{F}$			112m
		$^{16}\text{O} (^3\text{He}, p) ^{18}\text{F}$			112m
^{17}O	0.0373	$^{17}\text{O} (d, n) ^{18}\text{F}$		$5.5 \mu\text{c}/\mu\text{Ah}$	112m
^{18}O	0.2039	$^{18}\text{O} (p, n) ^{18}\text{F}$			112m

第14表 陽極酸化に用いた電解液の組成と電解条件

電 解 液	(COOH) ₂ の 2 % 溶液
陽 極	アルミ板 3cm×5cm×0.05cm
陰 極	Pb
電解液の温度	常 温
電 流	200mA 一定

た (γ, n) 反応以外に第13表に示すようなものがある。
このうち $^{16}\text{O} (^3\text{H}, n) ^{18}\text{F}$ は (t, n) 反応とよばれるもので、原子炉中の熱中性子によるつぎの核反応の結果として生成する三重水素核（トリトンとよばれ、 ^3H , T, t の記号であらわす）によつて行なわせることができる。

実際には Li F 粉末を原子炉中の熱中性子で衝撃することによつてトリトンがつくられるが、トリトンの運動エネルギーは 2.7MeVであつて、試料物質中での飛程が小さいため試料の内部まで放射化することはできない。粉体試料の酸素含有量をきめるには LiF粉末と粉体試料をよく混合したものを熱中性子で衝撃する。

第23図はアルミナ粉末を試料として上記の方法で1時間放射化した場合に得られる γ 線スペクトルで、 ^{18}O から生成する ^{18}F の γ 線ピークが 0.51MeV に観察される以外に Al_2O_3 中に含まれる他の不純物元素からできる γ 線ピークが存在することがわかる。

第24図はアルミナ、酸化ベリリウムなど酸素を含む各種の化合物を上記の (t, n) 反応で放射化したあと、G-M 計数管を用いて β 線を計数することによつて求めた放射能の壊変曲線で、大部分の試料では ^{18}F の半減期 (112m) とよく一致した減衰が認められる。第25図は試料として用いた場合の酸素量と放射能との関係を示す曲線であつて、これを検量線としてスポンジチタン粉末中の酸素量の分析を行なつた結果 7 % という値が得られた。

第26図は SAP 合金粉末中のアルミナ含有量をきめるために SAP 粉末の一定量 (100mg) と混合する Li F の重

量をかえ、原子炉トリガⅡ型で4時間の熱中性子衝撃を行なつた場合の Li F 重量と ^{18}F の 0.51MeV の γ 線の計数率との関係を示す曲線であつて、この図から一定重量の試料と混合する Li F の量が多いほど試料中に存在する酸素からできる ^{18}F の放射能が大きいこと、試料 100mg に対して Li F 300mg 以上では放射能の増加が少なくなることがわかる。

第27図は上記の条件で放射化を行なつた SAP 合金粉末および LiF 粉末の γ 線スペクトルで、第28図はこれらの γ 線スペクトル中の 0.51MeV のピークの減衰曲線を示すものである。この場合には Li F 粉末中に約 2.0% の酸素が不純物として含まれていることがわかつたので、放射化を行なつた Li F 粉末と SAP 合金粉末の混合物の ^{18}F の放射能を測定してから Li F 粉末中の酸素によつてできる ^{18}F の放射能を差引いて SAP 合金粉末中の酸素含有率をきめた。この実験の結果として酸素含有率 5.41 %、アルミナに換算して 11.5 % という値が得られた。

(γ, n) 反応を利用して酸素の放射化分析を行なうにはさきにも述べたように 15.605MeV 以上のエネルギーをもつ電磁波を用いなければならない。放射性核種の壊変の際に放出される γ 線のエネルギーは大部分の放射性核種では 2 MeV 以下であるため、(γ, n) 反応を利用して酸素の放射化分析を行なうには加速器で 15.605MeV 以上に加速した電子を白金のターゲットにあて、大きなエネルギーをもつ制動放射 X 線を発生させる。電子の加速エネルギーを E とすると、制動放射 X 線のエネルギー・スペクトルは E を最大エネルギーとする連続スペクトルになるので、 $^{16}\text{O} (\gamma, n) ^{16}\text{O}$ の核反応を効率よくおこさせるためには電子の加速エネルギーは 15.605 MeV よりも十分に大きくなければならない。

この目的に適した電子加速器としてはベータトロロン、またはライナツクをあげることができるが、ベータトロロンでは白金ターゲットにあたる電子流は約 0.1 μA でありライナツクのそれは 100 μA 以上であつて、ライナツクの

X線の線量率はベータトロン約1,000倍になる。そこで同じ加速エネルギーではライナックを用いる方が検出感度が1,000倍程度になる。

筆者らは日本原子力研究所にある High Voltage Corp. (U.S.A.) 製の 21MeV の電子ライナックを用い、純度 99.99% のアルミニウム板にアルマイト処理を行なったものについて (γ, n) 反応による酸素の定量を行なった。

第22図 (γ, n) 反応の励起関数曲線

第23図 (t, n) 反応で放射化したアルミナ試料の γ 線スペクトル

第24図 (n, t) (t, n) 複合核反応によって生成する種々の試料の放射能の衰変曲線

この実験に用いた陽極酸化用の電解液の組成は第14表に示すとおりである。第29図は最大エネルギー 21MeV、X線線量率 5×10^6 レントゲン/min (r/min) のライナックで2分間照射した試料の γ 線スペクトルで、(a) は衝撃終了後2分間の冷却を行なった際に得られるもの、(b) は10.5分間の冷却を行なった際に得られるものである。

これらの γ 線スペクトルでは 0.51MeV に ^{15}O の光電ピークが認められるほか、 (γ, n) 反応で生成する速中性子によって ^{27}Al (n, p) ^{27}Mg の反応が起こり、速中性子の減速によって生ずる熱中性子のために ^{27}Al (n, γ) ^{28}Al の反応がおこる結果、0.84MeV および1.02MeV に ^{27}Mg の光電ピーク、1.78MeV に ^{28}Al の光電ピークが観察さ

第25図 Ti 中の O_2 の放射化分析に用いる検量曲線

第26図 SAP 100mg に混合する Li F の重量と生成する ^{18}F の放射能との関係

れる。第15表にはアルミニウムおよび不純物元素に関する (γ, n) 反応およびこれに附随しておこる (n, p) 反応や (n, γ) 反応の性質を示した。

第30図はこの実験で標準試料として用いた高純度アルミナを15秒間照射した際に得られる γ 線スペクトルを示すもので、(a) は衝撃終了後3分間の冷却を行なったもの、(b) は26.7分間の冷却を行なったものである。

これらの γ 線スペクトルのうち 0.51MeV の光電ピークを比較することによってアルマイト皮膜中の酸素を定量した。第31図は陽極酸化の時間と生成する陽極酸化皮膜中の酸素の重量との関係を放射化分析によって求めたもので、定電流電解では電解時間と陽極酸化膜の重量と

が直線関係を示すことがわかる。

つぎに純度 99.99% のアルミニウム板を常温の空气中で酸化させたものを同様の方法で放射化した場合に得られる γ 線スペクトルは第32図の曲線 (a) になり、このスペクトル中の 0.51MeV の光電ピークの高さから酸化皮膜中の酸素の含有量をきめたのち、エメリー・ペーパーをつかつて表面の酸化皮膜を除去した試料の γ 線スペクトルを測定した。第32図の曲線 (b) は酸化皮膜を除去し

第27図 (t, n) 反応で放射化を行なった SAP粉末の γ 線スペクトル

第28図 (t, n) 反応で放射化を行なった SAP粉末の 0.51MeV における光電ピークの壊変曲線

第29図 21MeVのX線で (γ, n) 反応により放射化を行なったアルミニウム板の γ 線スペクトル
(a) アルマイト処理を行なったもの
(b) アルマイト皮膜を除去したもの

第30図 21MeVのX線で (γ, n) 反応により放射化を行なったアルミナ標準試料の γ 線スペクトル

た試料の γ 線スペクトルで、最初からアルミニウム中に含まれていた酸素によって生成した ^{18}F の光電ピークが0.51MeVに認められる。

第16表はこの実験の結果を示すもので、試料1からは空气中でできた酸化皮膜中の酸素量として試料1 cm^2 あたり $5.5 \times 10^{-2}\text{mg}$ という値が得られ、試料2からはアルミニウム中に含まれる酸素の含有率として $1.4 \times 10^2\text{ppm}$ という値が得られている。

第31図 (γ, n) 反応による放射化分析で求めた陽極酸化の処理時間と生成する酸化膜中の酸素重量との関係

第33図は 21MeV のライナツクで2分間照射して (γ, n) 反応をおこなわせた場合にアルミニウム中の不純物元素によって生成する放射性核種の γ 線スペクトルのうち0.51MeVの光電ピークを測定するものとしてその生長および減衰の様様を示すもので、各々の不純物元素の含

第32図 空气中で酸化させたアルミニウム板の (γ, n) 反応で得られた γ 線スペクトル
(a) 空气中にて常温で酸化させたもの
(b) 酸化皮膜を除去したもの

第15表 (γ, n) 反応によるアルミニウム中の酸素の分析に関係のある核反応

ターゲット核種	存在比 (%)	核反応の種類	生成する放射性核種	半減期 (min)	断面積 (mb)	しきい値 (MeV)	壊変の様式 (MeV)
^{16}O	97.76	(γ, n)	^{15}O	2.02	7.7	15.6	$\beta^+1.68$
^{27}Al	100	(n, γ)	^{28}Al	2.27	210		
^{27}Al	100	(n, p)	^{27}Mg	9.45			$\gamma 1.78$ $\gamma 0.84$ 1.02
^{63}Cu	69.1	(γ, n)	^{62}Cu	9.8	97	10.85	$\beta^+2.92$
^{65}Cu	30.9	(γ, n)	^{64}Cu	12.8h		9.75	$\beta^+0.66$
^{121}Sb	27.25	(γ, n)	^{120}Sb	16.5			$\beta^+1.7$
^{54}Fe	5.84	(γ, n)	^{53}Fe	8.9		11.15	$\beta^+2.5$
^{64}Zn	48.9	(γ, n)	^{63}Zn	38.3		11.65	$\beta^+2.36$
^{69}Ga	60.5	(γ, n)	^{68}Ga	68		10.10	$\beta^+1.88$
							$\gamma 1.18$ $\gamma 0.37$ $\gamma 1.10$

第16表 (γ, n) 反応で決定した試料中の酸素の含有率

試料番号	重量 (mg)	放射能 (cpm)	酸素重量 (mg)	O_2 含有率
1 (a)	117	3.7×10^4	6.4×10^{-2}	$5.3 \times 10^{-2}\text{mg/cm}^2$
2 (b)	230	1.8×10^4	3.2×10^{-2}	$1.4 \times 10^2 \text{ ppm}$

第33図 Al 中の代表的な不純物元素から (γ, n) 反応によって生成する放射能の生成曲線と壊変曲線

第35図 第34図に示した試料の 0.51MeV における光電ピークの壊変曲線

第34図 29MeV の X線により衝撃をおこなった SAP 合金およびアルミナ標準試料の γ 線スペクトル

第36図 ^{16}N の γ 線スペクトル (藤井)

第37図 酸素の検量線 (藤井)

第38図 (p, γ) 反応により放射化を行なった炭素鋼の放射能の壊変曲線

第17表 アルミニウム焼結合金の各種分析法による分析結果 (Al₂O₃ として)

分析法	SAP	APM	粉末
nominal value	(%) 12.9	(%) 14.0	(%)
オキシ法	15.3	15.8	
塩化法	17.6	18.9	
水素ガス法	13.7	15.9	
M T 法	2.5	11.2	
放射化法	12.9	13.6	13.3

第18表 14MeV 中性子による金属中の酸素の定量結果

試料		他の分析法による (%)	14MeV 放射化法 (CR方式) (%)
NBS 標準試料 No. 1042		0.017	0.019
チタン鍛造品	No. 1	0.557	0.57
	No. 2	0.082	0.088
ジルカロイ	No. 1	0.0911	0.087
フェロー-アルミニウム合金		0.002	0.005
		0.007	0.010
脱酸銅	No. 1	0.007	0.011
	No. 2	0.014	0.011
ステンレス鋼	No. 1	0.003	0.005
	No. 2	0.002	0.002
ニッケル	No. 1	0.137	0.14
	No. 2	0.005	0.004
	No. 3	0.005	0.004
タンタル粉末	No. 1	0.11	0.11
純アルミニウム	No. 1		0.014
	No. 2		0.014
タングステン粉末			0.12
モリブデン粉末			0.29

有率は純度 99.99% のアルミニウムについて中性子放射化分析できめた値を採用し、これらの元素の単体一定量を 21MeV の X 線で衝撃した場合に得られた放射能の比を用いて計算により求めたものである。

SAP 合金粉末中の酸素を定量するには前に説明したように (t, n) 反応を利用したが、焼結した試料については (t, n) 反応を応用することができないので、放射線医学総合研究所にある東芝製の 31MeV のベータトロンをつかって $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$ 反応により酸素の分析を行なった。この場合の X 線線量率は白金ターゲットから 1 m の距離で 200r/min であった。

第34図は加速電圧 29MeV の状態で発生させた制動 X 線により 6 分間衝撃を行なった場合にえられる SAP 合金の γ 線スペクトルで、第35図は 0.51MeV の光電ピークの減衰曲線である。この減衰曲線を解析すると半減期 2.1 分の ^{15}O 以外に半減期 20 分の核種が存在することになるが、これは不純物の Cu から $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$ の反応でできる半減期 9.8 分の ^{62}Cu やこれよりも半減期の少し長い他の放射性核種が混りあっているために平均として半減期 20 分という値がえられたものと思われる。

^{15}O 以外の放射性核種による計数値を差引いて ^{15}O による計数値を求め、これをアルミナ標準試料による値と比較して酸素含有率をきめた。

第17表は分析結果を示すもので放射化分析以外の方法による分析値は A 社が行なった分析値を借用したものである。

酸素の放射化分析では D-T 中性子発生装置からえられる 14MeV の速中性子を用い

$^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$, ^{16}N の半減期 7.4s

を利用する方法も可能である。

図36図は藤井氏らが D-T 中性子発生装置で発生させた 14MeV の速中性子を用いて砂糖中の酸素の放射化分析を行なった際上記の核反応によつてえられた ^{16}N の γ 線スペクトルを示すもので、6.31MeV および 7.13MeV に ^{16}N の光電ピークが観察される。

試料中に存在する他の元素が速中性子によつて核反応を行なうと酸素の分析のためには妨害核反応となるが、妨害核反応によつて生成する放射性核種の半減期が ^{16}N の 7.4 秒に比較してはるかに長い場合には、速中性子による衝撃時間を数秒～10 秒程度にすることにより妨害となる放射核種の生成を抑えることができる (5) 式および (6) 式参照)。

Na, Mg, Al, Si, Cl, V, Cr, Br, Se, Ag, Ba, Pr, Sm などの元素では速中性子による核反応の結果半減期が数秒～数分の放射性核種が生成し、しかもそれらの核反応の断面積はかなり大きな値である。そこで試料中にこれらの元素のいずれかが存在する場合には酸素の定量を妨

害することが予想されるが、 ^{16}N の半減期が短いため化学的分離操作を行なうことは不可能であつて、 γ 線スペクトロメトリーにより ^{16}N から放出される γ 線のみを測定することが要求される。

前にも説明したように ^{16}N から非常に大きなエネルギーの γ 線(6.31MeV, 7.13MeV)が放射されるので、 γ 線スペクトロメータのディスクリミネータを利用してあるエネルギー以上の γ 線のみを測定すれば ^{16}N から放出される γ 線だけ計数される。

第37図はサッカローズ粉末0~100mgのそれぞれに黒鉛粉末5gを加えて混合し、ペレットに成形したものについて求めた検量線であつて、酸素量と放射能計数値とはきわめてよい直線関係を示している。

第18表は種々の金属および合金中の酸素をこの方法で定量した結果を他の方法による分析値と比較したものである。

7.4.3 酸素以外の元素の放射化分析

放射化分析に利用される (n, γ) 反応以外の核反応についてはすでに本稿(その2)で説明したが、ここでは比較的軽い元素の分析例について説明しよう。

(1) ホウ素の定量

ホウ素は熱中性子および速中性子による放射化では適当な半減期をもつた放射性核種がえられないが、荷電粒子によるつぎの核反応を用いれば大きな検出感度がえられる。

$^{10}\text{B}(\frac{3}{2}\text{He}, n)^{13}\text{N}$ の半減期 10.1min

$^{10}\text{B}(\alpha, n)^{13}\text{N}$,

$^{10}\text{B}(p, n)^{11}\text{C}$, ^{11}C の半減期 20.4min

^{10}B の (p, n) 反応のしきい値は2.5MeVであるが、陽子のエネルギーが5~10MeVの範囲で断面積 σ は大きな値をとる。 ^{11}C を生成する他の核反応には

$^{14}\text{N}(p, \alpha)^{11}\text{C}$

$^{12}\text{C}(p, pn)^{11}\text{C}$

などがある。 ^{12}C の (p, pn) 反応のしきい値は19MeVであり、陽子のエネルギーを19MeV以下にすればこの核反応はおこらない。またチツ素とホウ素の等しい量をとつた場合には ^{10}B の (p, n) 反応でできる ^{11}C の放射能は ^{14}N の (p, α) 反応でできる ^{11}C のその約6倍になる。

(2) チツ素の定量

チツ素の放射化分析に用いられる核反応にはつぎのようなものがある。

$^{14}\text{N}(n, 2n)^{13}\text{N}$ の半減期 10min

$^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$

$^{14}\text{N}(d, n)^{15}\text{O}$, ^{15}O の半減期 2.1min

^{14}N の $(n, 2n)$ 反応では線束密度 10^{10} の14 MeV中性子で1ppm程度の定量が可能であり、反応のしきい値は10.9MeVである。

^{14}N の (γ, n) 反応を利用する場合には試料中に炭素および酸素が存在すると半減期20.5分の ^{11}C と半減期2.1分の ^{15}O ができ、しかも炭素および酸素の (γ, n) 反応の断面積はチツ素の (γ, n) 反応の断面積よりもはるかに大きい。ため、試料中の炭素や酸素の含有量に比較してチツ素の含有量ははるかに多い場合でないとチツ素の定量はむづかしい。しかし7.4.1で説明したように10.549MeV~15.605MeVのエネルギーをもつX線で (γ, n) 反応を行なわせることにより $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$ の反応だけをおこなうことができる。 ^{14}N は比較的半減期が長いために化学的な分離操作を併用することが可能であつて、アルミニウム、ベリリウム、ジルコニウム中のチツ素を定量するのに、10~20分間の放射化を行なつたあと、試料を酸洗いし、塩酸(または弗酸)に溶かし、キヤリアとして NH_4Cl を加え、 NaOH で中和してアンモニアを蒸留することによつて ^{14}N を捕集し、 ^{14}N から放出される β^+ 線のアニヒレーションで生ずる2本の γ 線のコインシデンス法による測定を行なうことによつて0.1ppmという検出感度がえられている。この実験はサクレ原子力研究所にある30MeVのライナックを使用して行なわれたものである。

(3) 炭素の定量

荷電粒子による核反応を利用した鉄鋼中の炭素の放射化分析は古くから研究されてきた。炭素の放射化分析に利用することのできる核反応としては

$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$, ^{11}C の半減期 20.5min

$^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$

$^{12}\text{C}(p, pn)^{11}\text{C}$

$^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$

などをあげることができる。

^{12}C の (γ, n) 反応についてはすでに7.4.1で説明したとおりであるが、X線照射を行なつた金属試料を酸素中で加熱して C^*O_2 ガスをつくり、放射性の C^*O_2 ガスを NaOH または NH_4OH 溶液に吸収させてコインシデンス法でその放射能を測定することにより0.1ppmの検出感度をうるることができる。

この方法に放射化法を用いる大きな利点は i) 照射後に酸洗いを行なうことができる、ii) $^{11}\text{CO}_2^*$ にキヤリアとして大量の非放射性の CO_2 ガスを加えることができる、iii) アルミニウムやジルコニウム中の炭素を定量する場合には溶解しやすく酸化しやすい合金をつくることによつて迅速に CO_2^* ガスを発生させることができる。などの利点がある。

^{12}C の (d, n) 反応は6.7MeVの重陽子で行なわせることができるが、重陽子による放射化では

$^{54}\text{Fe}(d, n)^{55}\text{Co}$

の核反応も行なわれるので、鋼中の炭素を定量する場合

には鉄から生成する ^{59}Co が妨害になる。

一方 ^{12}C の (p, γ) 反応は (d, n) 反応に比較すると収率が小さいが、妨害核種の影響がないのが利点である。

第38図は著者らが東京大学物性研究所にあるサイクロトロンを使用して陽子を 950keV に加速し、 $0.1\mu\text{A}$ の陽子流中で炭素 3.7 % を含む鋼を約20分間照射し、試料から放出される β^+ 線を G-M 計数管で測定した際にえられた放射能の壊変曲線である。この曲線から半減期を求めると10分という値がえられ、 ^{13}N の半減期とよく一致している。つまり (p, γ) 反応を用いれば鉄あるいは他の不純物元素による妨害がないので、鋼中の炭素の非破壊迅速

分析ができることがわかった。

(n, γ) 反応以外の核反応を利用して放射化分析を行なう場合には最初に説明したように反応のしきい値および励起関数の問題があるため放射化の条件の選び方は複雑である。また実用的な分析研究を行なった例もあまり多くなく、一方では加速器による放射化分析の精度、経済性、利用の難易などの問題もあるので今後従来の分析法あるいは原子炉による熱中性子放射化分析法との比較検討を行なうことにより、個々の場合についての長所および短所をあきらかにし、それによつて真の実用性を求めることが重要であると考えられる。

海外文献紹介 (23) ALUMINIUM AND ITS ALLOYS

* Compressive stress-strain properties of 2023-T3 aluminum-alloy sheet at elevated temperatures. U.S. National Advisory Committee for Aeronautics. 1956. 66p. (NACA TN 3853)

* Phenomenological relation between stress, strain rate, and temperature for metals at elevated temperatures. (7075-T6 aluminum alloy). U.S. NACA. 1957. 19p. (NACA TN 4000).

* Temperature dependence of the yield stress of copper and aluminum. Final report. Massachusetts Institute of Technology. 1957. 35p.

47 (表面処理)

* Cleaning and brightening aluminum aircraft surfaces. U.S. Naval Air Material Center. Aeronautical Material Lab. 1949. 55p.

* Degreasing of articles made out of aluminum alloys with the aid of trichloroethylene is dangerous. (Translated from De Veilgheid, Aug-Sept 1952). 1954. 7p.

* Practical vacuum treating of non-ferrous melts at the U.S. Naval Gun Factory. 1956. 26p.

48 (引張性)

* Tension properties of aluminum alloys in the presence of stress-raisers. I. Effects of triaxial stress states on the fracturing characteristics of 24S-T aluminum alloy. U.S. NACA. 1949. 55p. (NACA TN 1830)

* Tension properties of aluminum alloys in the presence of stress-raisers. II. Comparison of notch strength properties of 24S-T, 75S-T, and 24S-T86 aluminum alloys. U.S. NACA. 1949. 62p. (NACA TN 1831)

* Effect of open circular holes on tensile strength and elongation of sheet specimens of some aluminum alloys. Aluminum Company of America. 1949. 40p. (NACA TN 1974)

* Note on the tensile strength and elongation of wide plates of aluminum alloy with and without holes. Gt. Brit. Aeronautical Research Council. 1944. 8p. (ARC RM 2429)

* Experimental investigation and limit analysis of net area in tension. (Tensile properties of 61S-T6 aluminum alloy sheet, etc.) Brown University. 1953. 52p.

* Development of aluminum alloys for elevated temperature applications. First partial report: Effects of 14 elements on the short-time tensile and other properties of 43 binary six polynary aluminum alloys. U.S. Naval Research Lab. 1946. 71p.

* Tensile properties of 7075-T6 and 2024-T3 aluminum alloy sheet heated at uniform temperature rates under constant load. U.S. NACA. 1955. 46p. (NACA TN 3462)

* Tensile deformation of aluminum as a function of temperature, strain rate, and grain size. General Electric Co. 1955. 27p.

* Tensile properties of aircraft-structural metals at various rates of loading after rapid heating. (356-T6 aluminum alloy, etc.) Southern Research Institute. 1956. 199p.

* Effects of intermittent versus continuous heating upon the tensile properties of 2024-T4, 6061-T6, and 7075-T6 alloys. U.S. NACA. 1956. 7p. (NACA TN 1419)

* Tensile properties of aircraft-structural metals at various rates of loading after rapid heating. (Aclad 2024-T3 aluminum alloy, etc.) Southern Research Institute. 1957. 96p.