

# 原子炉・加速器によらない放射化

金沢大学理学部附属低レベル放射能実験施設

小村和久

## 1 はじめに

放射化分析は「原子炉か加速器を使って行うもの」であり「環境中性子を利用した放射化」は思っても見ないに違いない。しかし、極低バックグラウンド検出器を使えば、環境中性子による放射化は十分に検出可能なことが最近分ってきた。試薬を使った地上及び高所実験、飛行実験等によって、これまでに20を超える環境中性子誘導核種が確認されている。試薬ばかりでなく、金の指輪やネックレス、キッチンホイルや食卓塩も試料として利用できる。本稿では、放射化の観点から極低バックグラウンド検出器による環境中性子誘導核種の測定について紹介する。

小松市尾小屋町の旧尾小屋銅鉱山のトンネル(尾小屋一倉谷隧道, 546m)内に5年懸かりで手作りの地下測定室(水深換算で270m相当)を設置した。ここには、現在トップクラスの性能を誇る4台の極低バックグラウンドGe検出器と1台のSi $\beta$ 線検出器が稼働している。科研費の交付を受け、今年度中に2台の大型井戸型Ge検出器と2台の低エネルギー $\gamma$ 線測定用の平板型Ge検出器が設置される予定であり、1研究室が所有する極低バックグラウンドGe検出器の台数では世界一の規模となる。検出感度は地上設置の装置より約2桁高く、1カウント/日レベルの微弱放射能を検出することができる。

## 2 放射化を検出するための条件(ターゲット量と中性子フラックス)

放射化による生成放射能(A)はターゲット原子数(N)、照射粒子数( $\phi$ )及び反応断面積( $\sigma$ )の積 $N\phi\sigma$ で表すことができる。この式は「 $\phi$ が小さければターゲットの原子数Nを十分に大きくすれば同等の放射能が得られる」ことを示しており、環境中性子による放射化を考える出発点となる。1ppbレベルの元素を $10^{12}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の中性子で照射すると1gのターゲットを $10^3\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の中性子で照射することは同等である。環境中性子のフラックスは極めて低いが、十分なターゲットを使い、極低バックグラウンド検

出器を使うことでこの困難を克服すればよい。本稿では旧尾小屋鉱山のトンネル内に設置した極低バックグラウンドGe検出器<sup>1)</sup>を用いて行った環境中性子による誘導核種の検出について紹介する。

## 3 中性子源

### 3.1 環境中性子

放射化につかう線源は大気上層で一次宇宙線と大気成分との相互作用によって生成した中性子である。大気上層で生成した中性子は、大気によって吸収され、地表におけるフラックスは極めて低くなる。環境中性子の測定データは少なく、エネルギースペクトルもよく分っていないが、地磁気緯度、海拔高度、太陽活動、気象条件等によってフラックスが変化することが分かっている。海面高度におけるフラックス<sup>2)</sup>として $0.008\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (地磁気緯度50度)<sup>2)</sup>が広く用いられている。

大気による中性子フラックスの減衰は $I=I_0\exp(-d/L)$ で近似できる。L値は上空では $140\sim 200\text{gcm}^{-2}$ 、地表付近では地表に吸い寄せられるように $50\sim 70\text{gcm}^{-2}$ と小さくなることが知られている<sup>2,3)</sup>。土壌や岩石による吸収は中性子では報告がないが、荷電粒子で測定された値<sup>4)</sup>と大差ないとすれば $L\sim 200\text{gcm}^{-2}$ でほぼ近似できる。これらの値を使えば中性子フラックスは1500m高くなる毎に約2倍になり、航空機が飛行する10~12kmでは約100倍と高くなっていることが分る。地表から入射した中性子のほとんどは10mで吸収されてしまうが、透過力の大きなミューオンと岩石・土壌の構成成分との( $\mu$ , xn)反応や $\alpha$ 線放射体と軽元素との( $\alpha$ , n)反応による中性子の生成が地中で起るため、深度分布はやや複雑になる。ミューオンによる生成は深度とともに小さくなるが、( $\alpha$ , n)反応は深さとは関係なく起り、岩石中のウラン、トリウム及び軽元素の濃度に依存するので大深度でもわずかに中性子が存在することが確かめられている。

### 3.2 事故による中性子

1999年9月に発生したJCOの臨界事故は人工の中性子源の1つと考えてよい。事故時に発生した総中性子数はウラン溶液の分析から全核分裂数<sup>5)</sup>  $2.5 \times 10^{18}$ に、1核分裂当たりの中性子生成率2.5を乗じて約  $6 \times 10^{18}$ となる。その10~20%が環境中に漏えいしたとすれば、約  $10^{18}$ 個の中性子が環境物質を放射化させたことになる。文部省科研費による学術調査(代表:筆者)でも事故発生地点からかなり遠方まで放射化が起ったことが確認されている<sup>6)</sup>。

## 4 環境中性子による誘導放射性核種の検出

### 4.1 研究の動機

環境中性子による放射化は頭では理解できても、極めてフラックスの低い環境中性子で本当に放射化が検出できるとは筆者も考えてはいなかった。このような研究を開始したのは、1996年10月末に仏-伊国境のModernトンネル内の地下測定室(4000mwe: mwe = meters of water equivalent)を訪れた際に、極低バックグラウンドGe検出器を使うと宇宙線誘導核種が検出できるという話を聞いたことがその動機である。もう1つ<sup>152</sup>Euにまつわる話がある。筆者は1976年に可搬型のGe検出器を用いて原爆ドーム内で行ったin-situ測定で<sup>152</sup>Euの存在を初めて明らかにした<sup>7)</sup>。その後、<sup>152</sup>Euは原爆中性子の再評価に最も有効な核種であるとして精力的に測定された結果、爆心近傍では実測値は理論計算でほぼ再現できるのに、遠方では実測値を大きく上回ることが分かってきた<sup>8)</sup>。なぜこのような違いが起るのか全く分らず、様々な試みがなされたが、いまだ解決されていない。この謎は環境中性子で誘導された<sup>152</sup>Euや<sup>60</sup>Coの存在

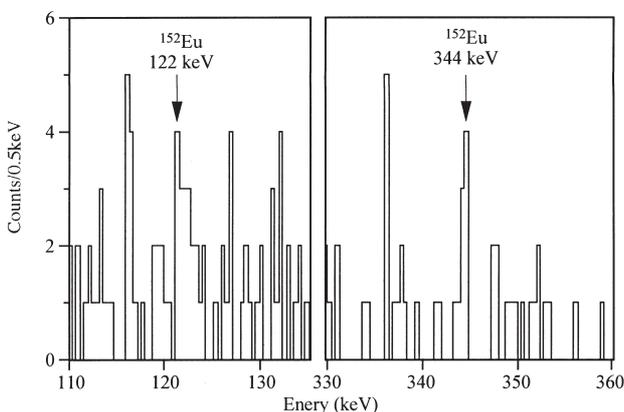


図1 環境中性子により生成した天然<sup>152</sup>Euの存在を示すγ線スペクトル

で説明されるのではないかと考えたのが、本研究を始めた直接の動機である。

### 4.2 地表レベルにおける環境中性子誘導核種

1998年4月、1gの酸化ユーロピウム試薬を平板型Ge検出器で測定を始めたところ、わずか一日後には<sup>152</sup>Euの存在を示唆する122keVと344keVのγ線ピークが見つかった(図1)。用いた試薬は1980年代に別の実験のために購入し、10年あまり試薬棚に保管してあったものであり、原子炉中性子等による照射歴がないことから、環境中性子によって誘導された「天然」放射性核種との確信を得た。これが環境中性子による誘導核種探査の出発点となった。

ただちに、地表における環境中性子フラックスとして報告されている  $0.008 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  すべてが熱中性子であると仮定して天然の同位体組成をもつ種々のターゲットについて計算したところ、表1に示すようなターゲット物質で中性子誘導核種が検出可能であることが分った。環境中性子照射により地表レベルで生成していく誘導核種の照射時間と生成量( $\text{dpm g}^{-1}$ )の関係を図2に示す。

1998年以来、検出に成功した環境中性子誘導核種は20を超える。半減期が短い核種は、中性子による生成を無視できる地下に保管して放射能を減衰(リセット)させれば、繰り返し使用が可能であり、極低レベル中性子のモニタリング法として利用できるものと考えられる。一方、半減期が長い核種はそ

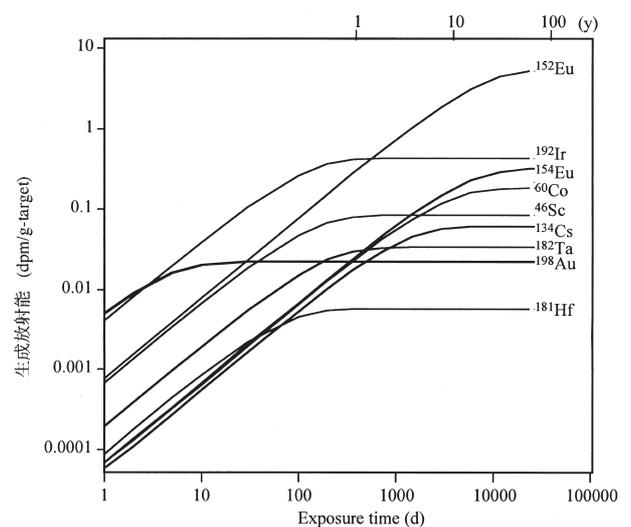


図2 環境中性子により生成する誘導核種の成長曲線  
中性子フラックス  $0.008 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  がすべてが熱中性子と仮定として計算

表1 環境中性子による放射化が期待される核種

ターゲット	同位体存在度(%)	断面積(b)*	生成核	半減期	ターゲット	同位体存在度(%)	断面積(b)*	生成核	半減期
<sup>23</sup> Na	100	0.53	<sup>24</sup> Na	15.0h	<sup>151</sup> Eu	47.77	5300	<sup>152</sup> Eu	13.3y
<sup>27</sup> Al	100	0.11	<sup>24</sup> Na	15.0h	<sup>151</sup> Eu	47.77	2800	<sup>152m</sup> Eu	9.30h
<sup>40</sup> Ar	99.6	0.61	<sup>41</sup> Ar	1.83h	<sup>153</sup> Eu	52.23	320	<sup>154</sup> Eu	8.80y
<sup>45</sup> Sc	100	27	<sup>46</sup> Sc	83.8d	<sup>158</sup> Gd	24.9	3.4	<sup>159</sup> Gd	18.5h
<sup>55</sup> Mn	100	13.3	<sup>56</sup> Mn	2.58h	<sup>164</sup> Dy	28.18	800	<sup>165</sup> Dy	2.35h
<sup>63</sup> Cu	69.1	4.5	<sup>64</sup> Cu	12.7h	<sup>159</sup> Tb	100	46	<sup>160</sup> Tb	72.3d
<sup>59</sup> Co	100	20	<sup>60</sup> Co	5.27y	<sup>165</sup> Ho	100	64	<sup>166</sup> Ho	26.9h
<sup>71</sup> Ga	39.8	5	<sup>73</sup> Ga	14.1h	<sup>170</sup> Er	27.07	9	<sup>171</sup> Er	7.52h
<sup>75</sup> As	100	4.5	<sup>76</sup> As	26.4h	<sup>174</sup> Yb	31.84	46	<sup>175</sup> Yb	4.20d
<sup>81</sup> Br	49.48	3	<sup>82</sup> Br	35.3h	<sup>176</sup> Lu	2.59	2100	<sup>177</sup> Lu	161h
<sup>108</sup> Pd	26.7	12	<sup>109</sup> Pd	13.4h	<sup>186</sup> W	28.4	40	<sup>187</sup> W	23.7h
<sup>115</sup> In			<sup>116m</sup> In	54m	<sup>185</sup> Re	37.07	110	<sup>186</sup> Re	3.72d
<sup>121</sup> Sb	57.25	6	<sup>122</sup> Sb	2.7d	<sup>187</sup> Re	62.93	70	<sup>188</sup> Re	16.7h
<sup>133</sup> Cs	100	28	<sup>134</sup> Cs	2.06y	<sup>181</sup> Ta	99.9877	21	<sup>182</sup> Ta	114.4d
<sup>139</sup> La	99.911	8.9	<sup>140</sup> La	1.68d	<sup>191</sup> Ir	38.5	750	<sup>192</sup> Ir	73.8d
<sup>141</sup> Pr	100	12	<sup>142</sup> Pr	19.2h	<sup>193</sup> Ir	61.5	110	<sup>194</sup> Ir	17.4h
<sup>148</sup> Nd	5.72	4	<sup>149</sup> Nd	1.73h	<sup>197</sup> Au	100	98.8	<sup>198</sup> Au	2.70d
<sup>152</sup> Sm	26.63	210	<sup>153</sup> Sm	46.8h	<sup>238</sup> U	99.275	2.73	<sup>239</sup> Np	2.36d
<sup>154</sup> Sm	22.53	5	<sup>155</sup> Sm/ <sup>155</sup> Eu	0.4h/4.76y					

\* Karlsruhe Nuclidkarte (1995) より

表2 実験で使用したターゲットとその使用量

(a) 地上実験(海拔約30m)					(b) 飛行実験及び高所実験				
元素	ターゲット物質	重量(g)	生成核	備考	元素	ターゲット物質	重量(g)	生成核	備考
Sc	酸化物	5	<sup>46</sup> Sc	新規購入	Na	食卓塩	100	<sup>24</sup> Na	
As	金属	50~200	<sup>76</sup> As	新規購入	Al	クッキングホイール	22	<sup>24</sup> Na	(n, α)反応
Co	酸化物	50	<sup>60</sup> Co	新規購入	Br	臭化ナトリウム	80	<sup>82</sup> Br	
	亜硝酸ナトリウム塩	50		>50年	Mn	金属	30~50	<sup>56</sup> Mn	登山実験
Cs	塩化物	50	<sup>134</sup> Cs	新規購入	Cu	銅貨	~100	<sup>64</sup> Cu	
	酸化物	1~12	<sup>152</sup> Eu/ <sup>154</sup> Eu	新規購入	La	酸化物	20~50	<sup>140</sup> La	
Eu	硝酸塩	1		>20年	Eu	酸化物	12	<sup>152m</sup> Eu	
	酸化物	12		>20年	Yb	酸化物	20	<sup>175</sup> Yb	
Ta	金属	100	<sup>182</sup> Ta	新規購入	Re	金属粉	5~20	<sup>186</sup> Re/ <sup>188</sup> Re	
Ir	酸化物	5~15	<sup>192</sup> Ir	新規購入	W	金属粉	50	<sup>187</sup> W	
Au	99.99%板	8~20	<sup>198</sup> Au	新規購入	Ir	酸化物	15	<sup>192</sup> Ir/ <sup>194</sup> Ir	
	99.99%粒(1~2mmf)	20~50		新規購入					
	金貨(24K)	20~31		新規購入					
	ネックレス(18K)	5~30		記念金貨					
	指輪(18K)	3~5							

の減衰を待つよりも、使用直前に放射能を測定しておいて、中性子照射によって増加した量を求めればよく、これも繰り返して使用できる。この場合にも「バックグラウンド」を下げるために、使用後の地下保管は必要である。

表2にこれまでに地上実験及び飛行実験で検出に成功しているターゲットとその使用量、検出核種等を示す。これらのうち、環境放射能あるいは核化学

的な観点から興味ある中性子誘導核種のいくつかを簡単に紹介する。

(a) <sup>60</sup>Co

環境中性子によって誘導された<sup>60</sup>Coの存在を証明するには、人工の<sup>60</sup>Coが存在する恐れのない古い試料が必要である。このような試料として工学部上田一正教授の好意により金沢工専(金沢大学工学部の前身)時代に購入した酸化コバルト及び亜硝酸コバ

ルト・ナトリウム塩を入手することができた。ラベルの漢字字体から、戦前に購入した試薬であり、人工の $^{60}\text{Co}$ の存在は無視できると判断した。測定の結果、両試薬ともに $^{60}\text{Co}$ の存在を確認することができた(図3は亜硝酸コバルト・ナトリウム塩の測定例)。 $^{60}\text{Co}$ の濃度は計算による推定値とほぼ一致し、確かに環境中性子による誘導核種と考えて良い。

前述のように、広島・長崎の原爆中性子で誘導された $^{60}\text{Co}$ の実測値は爆心からの距離とともに計算値を大きく上回ることが知られている。原爆投下後すでに10半減期以上経過している現在では、 $^{60}\text{Co}$ 濃度は生成時の1/1000以下に減衰していることを考えると、遠方の試料では環境中性子によって誘導された $^{60}\text{Co}$ の寄与を十分に考慮した解析が必要となる。

(b)  $^{155}\text{Eu}$

ユーロピウム試薬では殆どの試料で $^{152}\text{Eu}$ と $^{154}\text{Eu}$ の他に $^{155}\text{Eu}$ が検出される(図4)。ユーロピウムの安定同位体は $^{151}\text{Eu}$ と $^{153}\text{Eu}$ しか存在しないので、ユーロピウムからの $^{155}\text{Eu}$ の生成は考えられない。生成源としては $^{238}\text{U}$ の自発核分裂と $^{154}\text{Sm}$ の中性子捕獲反応で生成した半減期23.5分の $^{155}\text{Sm}$ の壊変による生成が考えられる。希土類鉱石中のウラン濃度が特に高いとは考えられないので、前者の可能性は無視できる。 $^{155}\text{Eu}$ はおそらく希土類物の鉱石中に存在するサマリウム中に生成した $^{155}\text{Eu}$ がユーロピウムを分離精製するさいにユーロピウムフラクションに濃縮されたと考えられる。この仮説が正しければ、分離後は $^{155}\text{Eu}$ は生成せず、壊変するのみなので、古い試薬中の $^{155}\text{Eu}$ 含有量は低くなっていると

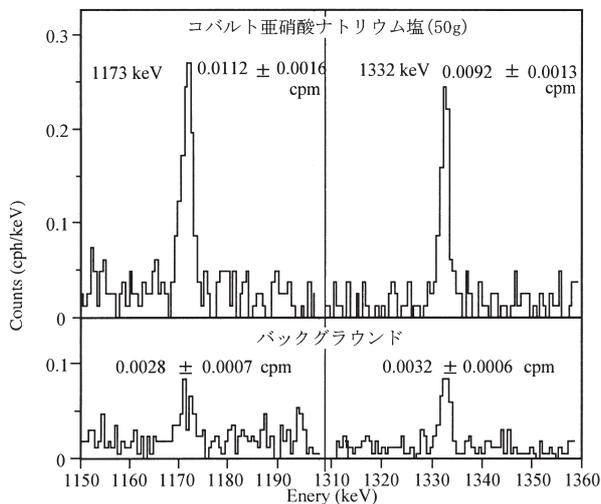


図3 戦前のコバルト試薬(上図)とバックグラウンドスペクトル(下図)

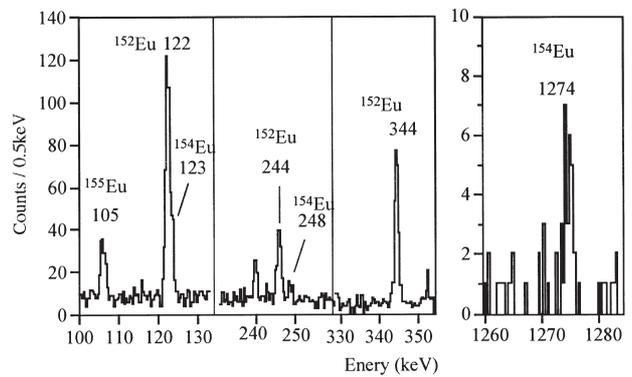


図4 環境中性子で誘導された天然の $^{152}\text{Eu}$ 、 $^{154}\text{Eu}$ と $^{155}\text{Eu}$   $\text{Eu}_2\text{O}_3$  (10g)

考えられる。購入時の分っているユーロピウム試薬(表2)の測定で古い試薬で確かに $^{155}\text{Eu}$ 濃度がなくなっており、仮説の妥当性を実証できた。

$^{155}\text{Eu}$ にはもう1つのエピソードがある。 $^{154}\text{Sm}$ 濃縮同位体(金沢大学理学部中西孝教授から借用)中に多量の $^{155}\text{Eu}$ が存在することが分かったことである(図5)。環境中性子によって誘導されたと考えられるには $^{155}\text{Eu}$ 濃度が高過ぎることに加え $^{152}\text{Eu}$ が存在していることから、同位体分離の過程あるいは保管中に人工中性子源による照射を受けて $^{155}\text{Eu}$ が生成したものと考えられる。

(c)  $^{192}\text{Ir}$

$^{191}\text{Ir}(n, g)^{192}\text{Ir}$ の反応の断面積は大きいので、数gのイリジウムがあれば環境中性子による誘導 $^{192}\text{Ir}$ を検出することができる(図6)。 $^{192}\text{Ir}$ は半減期が74日なので、数ヶ月から1年程度の中性子フルエンスを評価用するために有効なターゲットとして使うとよい。金とイリジウムその他の生成量の大きいターゲット

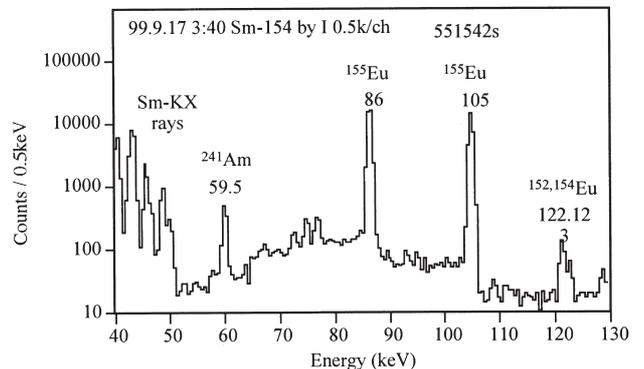


図5 購入した $^{154}\text{Sm}$ 濃縮同位体の $\gamma$ 線スペクトル  $^{155}\text{Eu}$ のほかに $^{152}\text{Eu}$ と $^{241}\text{Am}$ が不純物として存在する

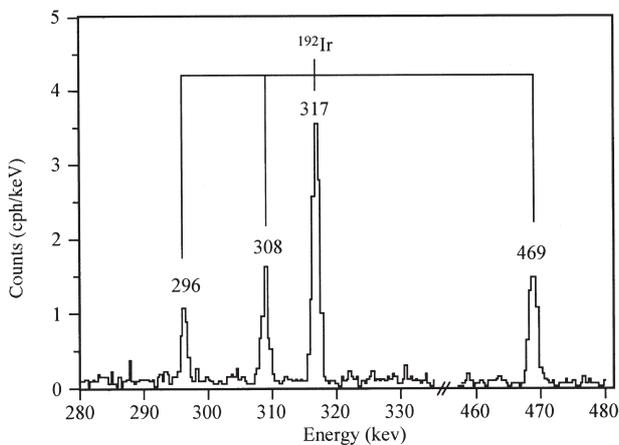


図6 環境中性子で生成した天然の $^{192}\text{Ir}$ , 酸化イリジウム 5 g

ットを組み合わせれば数日から1年にわたる中性子フルエンスを測定する高感度検出器を作ることが可能と思われる。

#### (d) $^{198}\text{Au}$

半減期2.7日の $^{198}\text{Au}$ は生成断面積が大きく、412 keVの $\gamma$ 線の検出も比較的容易なので中性子評価に最も有効なターゲットである。大形の井戸型Ge検出器を使えば数10gの金を使って地表レベルの環境中性子を比較的高い精度で評価することが可能である<sup>9)</sup>。設置期間は2週間以内で十分であり、使用後は地下に保存して繰り返し使うことができる。カドミウム板で包んでさらにパラフィンやポリエチレン板等の減速材で囲めば運搬中の中性子被ばくを避けることができる。

金は電源もカウンターも必要の無い超小型の中性子検出器として使うことができる。カウンターと比較して安価で(50gで約5万円)化学的に安定で、壊れる心配がない。また超小型の検出器なのでカウンター実験では困難な水中や土壌中の中性子測定も可能である。また、金製のネックレスや指輪、金貨なども中性子測定に使うことができる利点がある。JCO臨界事故では装飾品の金や金貨を用いた中性子評価は極めて有効であった。運搬には航空機の利用はできないので、陸路で尾小屋に運ぶ必要があった。測定の結果、事故地点から1400mまで事故由来の $^{198}\text{Au}$ を検出することができた<sup>10)</sup>。予備的な値であるが、1400m地点の中性子フルエンス(臨界継続中の全中性子数)は約 $3 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$ と推定される。金の測定開始は事故10日後であり、この時点で $^{198}\text{Au}$ 濃度は臨界終了時より1桁減衰していたことを考えると、事故直後に測定できたとすれば1500~1600m地点

まで漏えい中性子による $^{198}\text{Au}$ の生成を確認できたに違いない。

#### (e) その他の中性子誘導核種

中性子モニターとしての実用性は低いが、上記核種のほかに地表レベルの環境中性子による誘導核種としてこれまでに $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{76}\text{As}$ ,  $^{152\text{m}}\text{Eu}$ ,  $^{182}\text{Ta}$ の存在を確認しており、この数はさらに増える見込みである。

### 4.3 飛行実験

上述のように宇宙線に起因する環境中性子は高度とともに増加するので、飛行機を利用した中性子誘導核種の測定は地表実験よりも容易である。7~9 kmの高度を1時間前後飛行するフライトでは半減期が数時間以下の中性子誘導核種の実験に利用することができ、また数時間から10時間飛行する国際便(飛行高度11~12km)は半減期数日の誘導核種の実験に適している。これまでに実施した飛行実験で検出に成功した核種には $^{24}\text{Na}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{116\text{m}}\text{In}$ ,  $^{122}\text{Sb}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{160}\text{Tb}$ ,  $^{175}\text{Yb}$ ,  $^{187}\text{W}$ ,  $^{186}\text{Re}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ,  $^{194}\text{Ir}$ がある。これらのいくつかを紹介する。

#### (a) $^{24}\text{Na}^{11)}$

$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 及び $^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$ 反応で生成する半減期15時間の $^{24}\text{Na}$ の確認するために、New York-成田便の乗客にキッチンホイルと食卓塩を運んでもらい最初の飛行実験を行った。New York-成田便は約14時間の飛行であり、地磁気緯度の高い北極圏を飛行するので $^{24}\text{Na}$ の検出実験には都合がよいと考えたからである。尾小屋の測定開始は着陸後約10時間であった。測定開始数時間後で1368 keVの $\gamma$ 線が見え始め16時間後には図7に示すように全計数はわずか10数カウントしかないが立派なピークに育

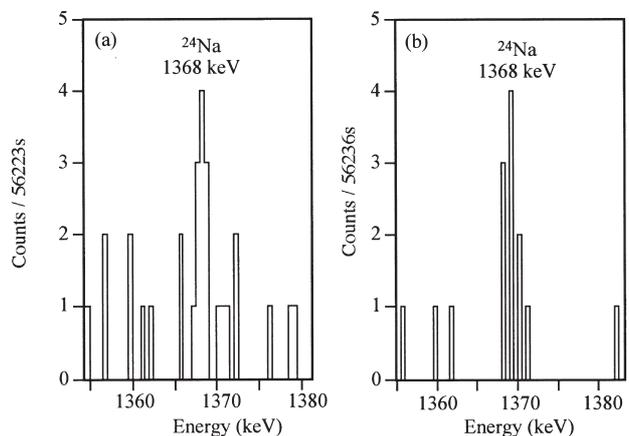


図7 New York-成田便で運んだキッチンホイル(a)と食卓塩(b)中に生成した $^{24}\text{Na}$

っている。この実験では速中性子と熱中性子を同時に評価することができた。

(b)  $^{116m}\text{In}$  及び  $^{56}\text{Mn}$

短半減期核種を検出するために、中性子捕獲断面籍が極めて大きいインジウムの  $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116m}\text{In}$  反応と  $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$  反応の検証を目的として約 50 g の試料を使って飛行実験を行った。羽田空港から小松空港への約 50 分の飛行時間のうち中性子誘導反応に寄与する高度 7 ~ 8 km の飛行はわずか 20 分前後である。着陸後ただちに尾小屋地下測定室へ運び、着陸後約 1 時間で測定を開始した。図 8 と 9 に得られたスペクトルを示す。ピーク計数は極めて少ないが  $^{116m}\text{In}$  及び  $^{56}\text{Mn}$  が確実に生成していることを確認した。

$^{56}\text{Mn}$  に関しては登山実験も行った。標高 2100m 地点(白山の南竜馬場ロッジ)に約 3 時間滞在して宇宙線中性子に曝露した後、急いで下山して 3 時間に測定を開始した。図 9 (b) はこの曝露実験で  $^{56}\text{Mn}$  の検出に成功した例である。この例から分るように、海面レベルの環境中性子では検出が困難な核種も 1000m クラスの高所で照射すれば検出可能になるものも多数はあるに違いない。

5 おわりに

本稿で紹介した放射化は、通常の放射化分析とは全く逆に照射粒子のフラックスを求めるものである。ターゲットは極めて小さいので、旅行時にポケットや鞆に入れて運ぶことで中性子照射を行ったり、地中、水中に設置して深度分布を正確に測定するなど、カウンター実験では不可能あるいは極めて困難な測定ができるという特長がある。極低バックグラウン

ド検出器を使うことで  $10^{-4}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  という極低レベルの中性子測定も可能な方法であり、今後の応用面の開発が期待される。

(本稿は放射化分析 12, 9-19 (2001) に掲載された論文に少し手を加えて作成した。)

参考文献

- 1) 小村和久: 極低レベル放射能測定を目的とする尾小屋計画, 放射線科学, **37**, 281-286 (1994); 同 **37**, 381-386 (1994); 小村和久: 極低レベル放射能測定, ぶんせき 12月号, 730-735 (2000); 小村和久: 極低レベル放射能測定最前線, 放射線, **26**, 41-57 (2000); K. Komura: Proc. Wakasa International Symposium on Environmental Radiation, Oct. 20, 1997, held at Tsuruga, Fukui, Japan, 56-75 (1997)
- 2) J. E. Hewitt, L. Hughes, J. B. McCaslin, A. M. Smith, L. D. Stephens, C. A. Syvertson, R. H. Thomas and A. B. Tucker: *Natural Radiation Environment III*, Vol. (2), Proceeding of a symposium held at Houston, Texas, April 23-28, 1978, USDOE, 855-771 (1980)
- 3) M. Kodama, S. Kawasaki, T. Imai, K. Takahashi and M. Wada: Anomalous atmospheric attenuation of cosmic-ray-produced neutrons near earth's surface, *Natural Radiation Environment III*, Vol. (2), Proceeding of a symposium held at Houston, Texas, April 23-28, 1978, USDOE, 882-895 (1980)
- 4) T. E. Cerling and H. Craig: Geomorphology and in-situ cosmogenic isotopes, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **22**, 273-317 (1994)
- 5) 原子力安全委員会ウラン加工工場臨界事故調査

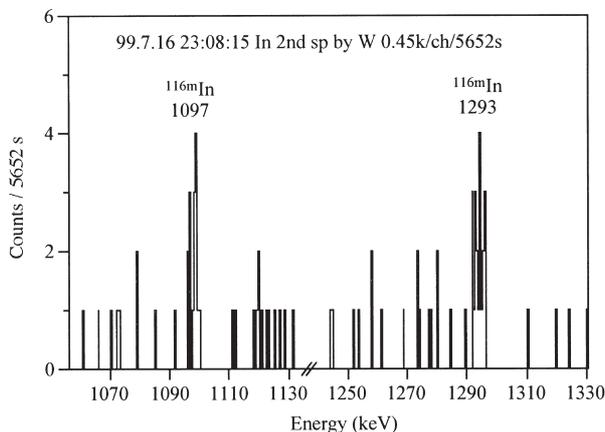


図 8 羽田一小松便の飛行で生成した半減期 54 分の  $^{116m}\text{In}$  の検出

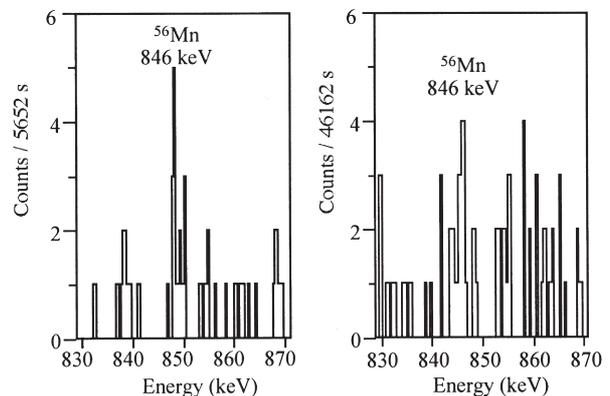


図 9 環境中性子で生成した  $^{56}\text{Mn}$  の検出 (a) 羽田一小松便フライト実験, (b) 2100m 地点での高所実験

- 委員会, ウラン加工工場事故調査委員会報告, 科学技術庁 (1999)
- 6) *Journal of Environmental Radioactivity*, **50** (1-2) (2000) (Special Issue: The Tokai-mura Accident)
- 7) 阪上正信, 小村和久: 環境放射能とその線量率の In-Situ  $\gamma$  Spectrometry による研究成果, 京都大学原子炉実験所報告, KUR-TR-155, 2035 (1977); T. Nakanishi, T. Imura, K. Komura and M. Sakanoue:  $^{152}\text{Eu}$  in samples exposed to the nuclear explosions at Hiroshima and Nagasaki, *Nature*, **203**, 32-34 (1983)
- 8) T. Nakanishi, K. Kobayashi, T. Yamamoto and K. Miyaji: Residual neutron-induced activities in samples exposed in Hiroshima, "US-Japan Joint Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry in Hiroshima and Nagasaki" (Final Report), *Radiation Effects Research Foundation*, **2**, 310-319 (1987)
- 9) 小村和久: 極低レベル放射能測定技術の応用—金ターゲットによる中性子計測, *Isotope News*, 2000年5月号, 6-11 (2000)
- 10) K. Komura, A. M. Youser, Y. Murata, T. Mitsugashira, R. Seki and T. Imanaka: Activation of gold by the neutrons from the JCO accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, **50**, 77-82 (2000)
- 11) 小村和久: 環境中性子による放射化とその応用 (3). 食卓塩とキッチンホイルによる飛行高度における中性子測定, 放射化学討論会要旨集, 207 (1999)