



磁場共鳴分離器について：  
cyclotronにおける同位原素効果によるPhase  
Stability

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2012-11-07 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 佐々木, 一郎 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.32150/00000393">https://doi.org/10.32150/00000393</a>

“磁場共鳴分離器”<sup>\*</sup>について

— Cyclotron における “同位元素効果による Phase Stability” —

佐々木 一郎

北海道学芸大学釧路分校物理学教室

Ichiro SASAKI: Phase Stability due to Isotopic Effect in Cyclotron as the Isotope Separator

筆者はさきに電気学会論文集 (第 5 卷, 第 2 号) に, 当時  $U^{235}$  の分離を目的とした「共振加減速による同位体分離」と題する報告において, “共振分離” と仮称する方法を提案し, 線型共振加減速法と磁場共振加減速法とに分けて, 若干の理論的計算の結果について報告したのであるが, 本報文はそのうちの磁場共鳴分離器についての補遺的報告である。

いま磁場共鳴分離器 (第 1 図) において分離すべき同位元素として質量  $M, M'$  なる二種の同位元素より成る一価イオンの混合気体が与えられたとし, 磁場を  $H$ , 高周波電場を

$$\left. \begin{aligned} u &= U \sin 2\pi f t \\ f &= H e / 2\pi M \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

とする。但し  $e$ : 荷電量, こゝでは電子電荷に等しい。即ち質量  $M$  なる同位元素を共鳴同位元素とする。そうすると, 共鳴同位元素および非共鳴同位元素のエネルギー  $E$  および  $E'$  は次のように与えられる。但し荷電体の入射エネルギー及び加速間隙の transient time は無視する。

$$E = \rho^2 H^2 e / 2M \dots\dots\dots(2)$$

但し  $\rho$ : 共鳴同位元素の軌道半径

$$\left. \begin{aligned} E' &= U^* \sin(2\pi f t + n\theta) \\ U^* &= U / \sin\theta \sin(n+1)\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

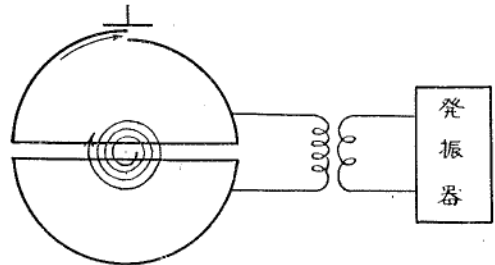
但し  $n$ : 非共鳴同位元素が加速間隙に出現する回数。

$$\theta = (M' - M) / M \pi / 2 \text{ or } (M' / M - 1) \pi / 2$$

即ち非共鳴同位元素のエネルギー  $E = \phi(t)$  は  $U^*$  を振幅とする一種の位相並にエネルギー振動を行うことを示している。さらに  $U^* = \phi(n, \theta)$  は  $\theta$  (これを “比質量差角,” と仮称する) あるいは  $(M' - M) / M$  即ち比質量差を parameter とすれば,  $U / \sin\theta$  を振幅とする  $U^* = \phi(n)$  なる振動を行うことを示している (第 2 図)。従つて非共鳴同位元素の達し得る最大瞬間エネルギー  $E \max$  は

$$E \max = U / \sin\theta = \phi(\theta) \dots\dots\dots(4)$$

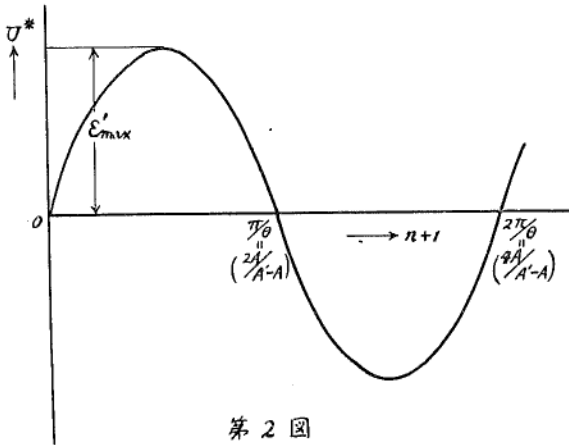
であつて, いかに回転するもこれ以上に加速せられることはない。いまこの  $E' \max$  に相当する非



第 1 図

\* 特許第 176878 号

“磁場共鳴分離器” について



第 2 図

として、この曲線図を作成しておけば便利である。

いま同位元素の質量を簡単のため水素質量  $m_H$  の整数倍と看なして、質量数  $A$  及  $A'$  を用い、 $M = Am_H = 1.66 \cdot 10^{-24} A$  gr.  $M' = A'm_H = 1.66 \cdot 10^{-24} A'$  gr.

とすれば、既知の安定なる  $H$  より  $P_b$  に至る同位元素については上記の諸式において質量数  $A, A' = 1(H') \sim 208(P_b^{208})$ ,

比質量差  $(M' - M)/M = 1(A = H', A' = H^2) \sim \frac{1}{208}$  ( $A =$

$P_b^{208}, A' = P_b^{207}$ ) の間に在る。また非共鳴同位元素エネルギー振動の最大瞬間値  $E'_{max}$  を比質量差  $\theta$ , あるいは

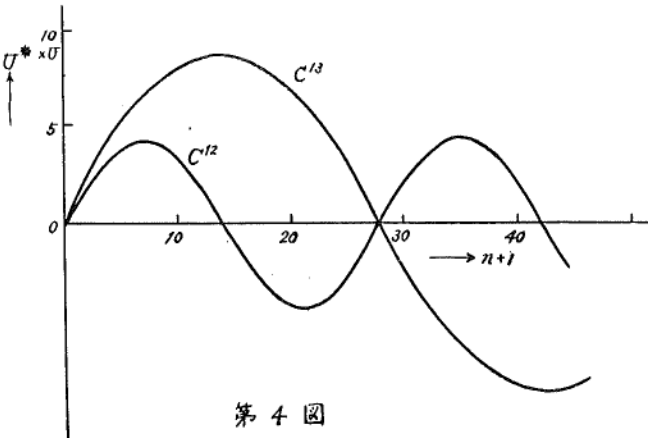
比質量差  $(M' - M)/M$  の函数として表わせれば、第 3 図に

示すとおりであつて、 $E'_{max}$  は  $H \left( \frac{A=2}{A'=1} \right)$  の  $1 \cdot U$  を除

き、 $Li \left( \frac{A=6}{A'=7} \right)$  より  $P_b \left( \frac{A=208}{A'=207} \right)$  に至るまで、 $3.86 U$

より  $79U$  の間に在ることを知る。つぎに(6)及(7)式に数値

を代入すれば、



第 4 図

共鳴同位元素の回転半径を  $\rho'_{max}$  とするならば、

$$E'_{max} = \rho'^2_{max} H^2 e / 2M' \dots\dots(5)$$

なる関係がある。

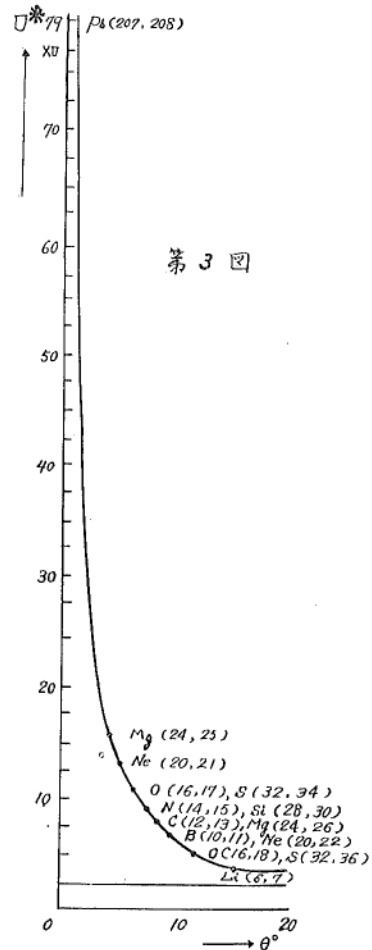
この分離器においては、 $f$  は(1)式により、また  $U, H, \rho$  は(4),(5)式により決定されるが、この際  $R$  (加速電極の半径)  $> \rho'_{max}$  なるごとく設計すればよいわけである。この設計の大勢を知るためには、(1)より

$$f/H = e/2\pi M = \phi(M) \dots\dots(6)$$

および(4), (5)より

$$\rho'_{max} H^2 = 2M'/e E'_{max} \text{ or}$$

$$\rho'_{max} H = \sqrt{2M'/e E'_{max}} = \phi(\theta) \dots\dots(7)$$



第 3 図

第 1 表

C <sup>14</sup> (A=14, A'=13, 12)				
			H=1,000g V=1,000v	H=5,000g V=1,000v
f/H (C <sup>14</sup> )	109	f (C <sup>14</sup> )	109KC	545KC
ρ'maxH(C <sup>13</sup> )	15.55·10 <sup>-2</sup> √U	ρ'max (C <sup>13</sup> )	49.2cm	9.84cm
" (C <sup>12</sup> )	10.67·10 <sup>-2</sup> √U	" (C <sup>12</sup> )	33.45cm	6.75cm
E'max (C <sup>13</sup> )	8,834U	E'max (C <sup>13</sup> )	8,834eV	8,834eV
" (C <sup>12</sup> )	4,500U	" (C <sup>12</sup> )	4,500eV	4,500eV

K <sup>42</sup> (A=42, A'=41, 40, 39)				
			H=1,000g V=1,000v	H=5,000g V=1,000v
f/H (K <sup>42</sup> )	38.0	f (K <sup>42</sup> )	38.7KC	193.5KC
ρ'maxH(K <sup>41</sup> )	48.10·10 <sup>-2</sup> √U	ρ'max (K <sup>41</sup> )	152.0cm	30.4cm
" (K <sup>40</sup> )	33.57·10 <sup>-2</sup> √U	" (K <sup>40</sup> )	106.0cm	21.2cm
" (K <sup>39</sup> )	27.16·10 <sup>-2</sup> √U	" (K <sup>39</sup> )	85.8cm	17.16cm
E'max (K <sup>41</sup> )	26,740U	E'max (K <sup>41</sup> )	26,740eV	26,740eV
" (K <sup>40</sup> )	13,370U	" (K <sup>40</sup> )	13,370eV	13,370eV
" (K <sup>39</sup> )	9,000U	" (K <sup>39</sup> )	9,000eV	9,000eV

$$f/H = 1.525 \cdot 4/A$$

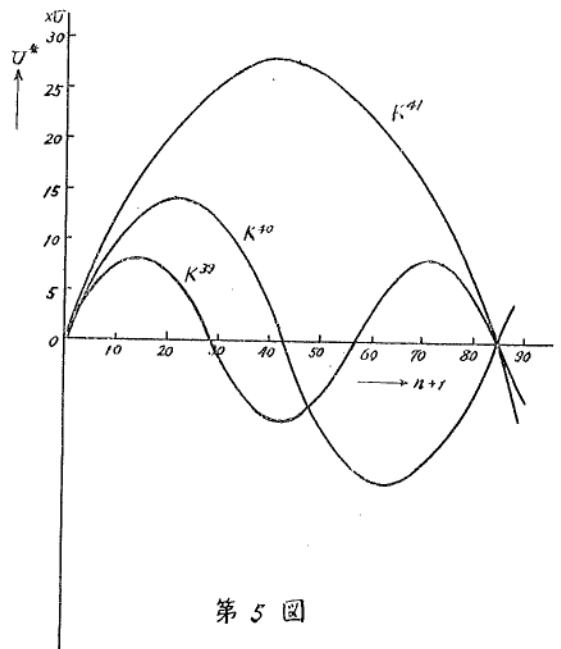
$$\rho'max H = 1.45 \cdot 10^{-2} \sqrt{A'} E'max =$$

$$1.45 \cdot 10^{-2} \sqrt{A'} \sqrt{V/\sin\theta} \text{ cm-gauss.}$$

$$U \text{ in e. m. u.} = 10^8 V \quad V \text{ in volt.}$$

となり、C<sup>14</sup>(A=14, A'=13,12), 及び K<sup>42</sup>(A=24, A'=41, 40, 39) の分離について計算例を示せば、第 1 表のとおりである。また非共鳴同位元素エネルギー曲線 U\* = φ(n) は第 4 図及び第 5 図に示すとおりである。

さて上記共鳴同位元素についてのエネルギー式は荷電粒子加速器としての cyclotron における所謂 phase stability の問題を想起させるであろう。即ち、ある一定のエネルギー（平衡エネルギー）をもつた粒子の加速による相対性質量変化を考慮する場合、加速電場との共鳴状態が変化して、結局共鳴位相の変化に伴い、加速と減速とが繰返されて、平衡エネルギーにまで修正されようとするのであるが、このため一種の位相並にエネルギー振動が起きて、粒子がいか



第 5 図

## “磁場共鳴分離器”について

に軌道を描いても、平均としては平衡エネルギーを超えることはないという事実である。これは相対性質量変化の程度によつて、その振動状態に緩急の差はあるが、平衡値附近のエネルギーをもつた粒子があれば必ず起るのであつて、陽子、重陽子、Helium などの重粒子の加速においては、相当のエネルギーまで相対性質量変化の程度が小さいため、エネルギー振動の極く緩慢な場合と考えられて、加速の限界を与えるに止まるのであるが、電子の加速においては、相対性質量変化が大きいため、本質的問題となつて、cyclotron が電子の加速に不適當な所以とされるのである。この cyclotron における共鳴上の欠点を  $H$  或は  $f$  の変化によつて技術的に改良したのが所謂 synchrotron であることは周知のとおりである。

しかるに、上記の分離器についてのエネルギー式は正に同様の関係を示している。即ち、 $M'$  の変化が連続函数的な場合が加速器としての cyclotron における phase stability をあらわすものである。従つて荷電重粒子加速器としての cyclotron においては、同位元素効果による phase stability の現象が同時に存在している筈である。即ち、上記の相対性質量変化による phase stability の現象は粒子の質量自体が速度の函数として連続的に変化することに起因するのであるが、phase stability の本質は加速電場との共鳴状態が厳密に存在しないことにあるのであるから、かゝる条件を満足するような質量をもつ粒子、即ち非共鳴粒子があれば、同様の現象が起るのは当然であつて、筆者はかゝる観点から、cyclotron によつて得られる高速度粒子流について、質量変化が非連続的な特別の場合とも考えられるような、“同位元素効果による phase stability”とも称すべき現象を予想したのである。而してこれを積極的に利用したのが即ち磁場共鳴分離器であつて、この場合は相対性質量変化による phase stability は  $E'_{\max}$  の最高値が  $P_0$  における  $A=207$ ,  $A'=208$  に対する  $79U$  の程度であるから、分離の目的に対しては特に問題とはならないのである。

この分離器における問題の一つはイオン源である。もし強力なイオン発生器により元素ガスイオンが豊富に供給せられるならば、ある一定以上の  $R(>\rho'_{\max})$  を有する分離器において  $f, H, U$  の調節により凡ゆる既知の同位元素分離に通用して、欲する同位元素の分離集中が可能である。また、 $f, U, H$  の精密な調整によつて従来分析装置では検出し得なかつたような極微量の新同位元素の集積検出を予想することもあながち無理ではない。即ち、尖鋭な質量分析器、あるいはイオン分析器となり得るものである。なお以上は cyclotron 型について述べたけれども、磁場共鳴分離器としては Betatron、あるいは空洞共振器を用いた荷電粒子加速器のごときも利用せられ得るであらう。(1947. 9. 12)

本文は未発表旧稿を若干改訂したものであるが、この機会に当時御指導を賜つた恩師鳥山博士(元北大、現東北大学教授)に遥かに深謝の意を捧げる次第である。

附記 本文の方式と全く同様の原理による装置が、米国において Sommer, Thomas および Hipple によつてイオン分析器として発表され、“Omegatron”と名づけられているが、筆者はそれよりも先に昭和19年1月号の電気学会論文集に同位体の“共振分離”方式として発表し、昭和23年5月11日に特許を得ていることを再記する。なお筆者の方式は太平洋戦争中にウラニウム235分離の目的で、軍関係機関において試験されることになつていたことを附記する。