

中性子過剰核の構造研究に向けた β 線検出型核磁気共鳴法における新型RF磁場制御系の開発

KAWAGUCHI, Takafumi / 川口, 高史

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

59

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2018-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00021608>

中性子過剰核の構造研究に向けたβ線検出型核磁気共鳴法における新型RF磁場制御系の開発

DEVELOPMENT OF A NEW RF MAGNETIC FIELD CONTROL SYSTEM FOR B-DETECTED NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE METHOD FOR STRUCTURAL STUDIES OF NEUTRON RICH NUCLEI

川口高史

Takafumi KAWAGUCHI

指導教員 松尾由賀利

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻修士課程

In the recent nuclear physics, nuclear properties of unstable nuclei located far from the β-stability line have been intensively studied. The β-NMR method is one of the most powerful methods to investigate these properties by measuring nuclear g-factors and Q-moments. In this method, however, applicable nuclei are limited to those with longer β-decay half-lives than ~10 ms. In the present study, a new β-NMR system for nuclei with half-lives of a few ms is developed to apply an oscillating magnetic field in a shorter time than their half-lives, introducing a new function generator attached the high-performance FPGA.

Key Words : Nuclear Magnetic / Quadrupole Resonance , Function Generator , Neutron Rich Nuclei , FPGA(Field Programmable Gate Array) , β-ray Asymmetry

1. 序論

(1) 物理学的背景

原子核は、有限個の陽子と中性子から構成され、互いの短距離間に働く相互作用により強く束縛され有限量子多体系を形成している。その構造は、長年安定な原子核またはその周辺の原子核で調べられてきており、二つの大きな特徴があることが知られている：① 陽子数・中性子数のどちらかもしくは両方が魔法数(原子核を構成する陽子数 Z または中性子数 N が 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, …の場合)の時は、安定でその形は球形である。② 魔法数から離れた領域では軸対称に変形し回転など集団的な運動をする。しかし近年の安定核から遠く離れた中性子(または陽子)過剰な原子核では安定核では現れなかった異常な原子核構造が発見されている。図1にFまでを抜き出した核図表を示す。

安定同位体より左側では陽子過剰核、右側では中性子過剰核を表している。 $N/Z=1\sim 1.5$ の安定核が存在する領域から離れると、異常な核構造をとり、最近では陽子数 Z または中性子数 N が魔法数の場合であっても変形していることが分かってきた[1]。これらの不安定核構造を研究するためには、原子核中の核子一つ一つがどのような軌道で運動しているか(単一粒子運動)・原子核全体が集団としてどのような振る舞いをしているか(集団運動)ということの詳細に調べる必要がある。そのためには単一粒子構造の軌道に感度のある磁気双極子モーメント(μ モーメント、特に μ モーメントを核スピン I で割ったものを g 因子と呼ぶ、第2章参照)、原子核の形に感度のある電気四重極モーメント(Q モーメント)などの核電磁気モーメントの測定は非常に有用である。

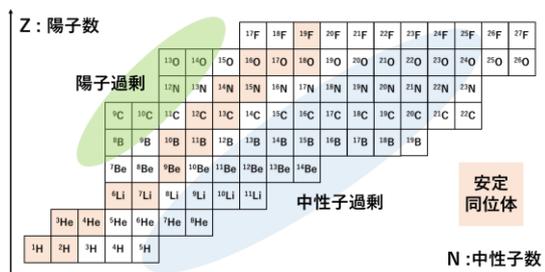


図1 核図表の概略図

(2) これまでの研究状況

理化学研究所・β-NMRグループでは核スピンの向きが空間的に揃った(スピン偏極した)中性子過剰核がβ崩壊する際に放出するβ線の非対称性を利用し、β線検出型核磁気共鳴法(β-NMR法)に基づく核電磁気モーメントの測定を行っている(第2章参照)。この測定により安定核領域から遠く離れた領域に存在する不安定核を対象とした核構造研究を行っている[2-6]。

β -NMR 法では不安定核に高周波共鳴周波数を含む RF 振動磁場を印加し、非対称放出された β 線を検出して測定を行う。この振動磁場を印加する磁場印加系システムは複数の実験装置群によって構成され、PSG (Programmable Sequential Generator) を用いてシーケンスを組んで制御している [7]。実験では不安定核寿命より短い時間内に、共鳴周波数に対応する高周波の振動磁場を時系列的に印加するためのシーケンスを組む必要がある。そのため、寿命の短い不安定核を対象とする場合、①測定の高効率化および②振動磁場の印加の高速化が必須である。

近年、上で挙げた①の測定の高効率化を図るために、磁場印加系システムの改良及び開発が行われてきた [8]。この磁場印加系システムの更新により、核磁気モーメント、特に g 因子及び Q モーメントに対して高精度かつ高効率の測定が可能となっている。しかし②の磁場の印加の高速化に関してはまだ不十分である。特に、 Q モーメント測定では複数の振動磁場を時系列的に印加するため [7]、より長時間の測定が必要となり、シーケンスの時間が不安定核寿命を超えてしまうという問題が指摘されてきた。そのため複数の振動磁場を合成し一度に印加することで、シーケンスの時間を短縮する方法が考案されてきた [9]。しかし、現行の振動磁場を印加する際に使用している任意波形発生器 (NF ブロック社製の WF1974) では、第 3 章で後述のように複数の周波数が合成された正弦波を出力できないことや外部トリガーを用いた制御の方法が限られていることなどの理由から、上で挙げた手法は使用できない。そのためより短寿命な中性子過剰核を対象とした Q モーメントを測定するためには、磁場印加系システムの制御性の向上、測定時間の短縮化ができるシステムを構築することが求められている。

(3) 本研究の目的

本研究では (2) で述べた問題を解決するため、FPGA(Field Programmable Gate Array)ベースの任意波形発生器 TCV-281-W (多摩川電子社製) を新たに導入し、新型磁場印加系システムを開発した。当任意波形発生器は PSG から入力される 2 種類のトリガーを用いて振動磁場 (RF) を出力する。第 3 章で後述するが実験では複数の RF を RF1 \rightarrow RF2 \rightarrow ... という順番に印加する。ここで一つ目のトリガーが入力されることで RF を印加する順番を初期化させ、RF の数と同数の二つ目のトリガーが入力されることで順番通りに RF を出力する。このトリガーの掛け方によって、シーケンスが命令した時間通りに RF を出力することができる。更に振動磁場を合成することができ、不安定核寿命が短い原子核を対象とした Q モーメント測定が可能となる。

その適用の前に本研究では β -NMR 法による ^{21}F 核の既知の g 因子の測定を行うことで当任意波形発生器の

性能評価を行った。従来型磁場印加系システムと新型磁場印加系システムの双方で測定を行い、測定結果の比較検討を行った。この比較検討から新型任意波形発生器 TCV-281-W が今後の Q モーメント測定に有効であるかを議論することが本研究の目的となる。

2. 核電磁気モーメントと測定原理

(1) 核電磁気モーメント

原子核の状態が不安定核であることや形状が球形ではないといった異常構造が表れている核構造を定量的に調べるためには核電磁気モーメントを測定することが有用である。核電磁気モーメントを測定することで測定対象核の運動状態、スピンという物理情報及び形状を求めることができる。

a) 磁気双極子モーメント

磁気双極子モーメント μ は原子核内の核子の軌道角運動量及びスピンを反映する物理量であり、核磁子 μ_N 、 g 因子、核スピン I を用いて次式で定義される [10]。

$$\mu = g\mu_N I \quad (1)$$

磁気双極子モーメント μ を求めるためには g 因子を求められれば良い。

b) 電気四重極モーメント

電気四重極モーメントは原子核を球形と見立てた場合、電荷分布のずれを表す物理量であり、原子核の変形を表している [10]。ここで原子核内に電荷が一様に分布し z 軸のまわりの対象な構造を考える。 z 軸に対称及び垂直な方の軸の長さをそれぞれ a, b と置く

$$Q = \frac{2}{5} Z(b^2 - a^2) \quad (2)$$

$Q \neq 0$ の場合では原子核は回転楕円体であることを表している。 $Q > 0$ であれば $b > a$ となりプロレート型 (レモン型) を表している。 $Q < 0$ であれば $b < a$ となりオブレート型 (ミカン型) を表している。

(2) β 線検出型核磁気共鳴法

不安定核構造の核磁気モーメントを測定するためには β 線検出型核磁気共鳴法 (β -NMR 法) を用いる [11]。不安定核原子は β 線 (高いエネルギーを持った電子) を放出してより安定な原子核に壊変する。これを β 崩壊と呼ぶ。通常は図 2 の (a) が示すように不安定核の核スピンの向きは無秩序な方向を向き空間的に均等に β 線を放出している。 β -NMR 法における重要な点の一つの原子核に注目した場合、図 2 の (b) が示すように、 β 崩壊時に放出される β 線は原子核が持つ核スピンの向き

に対して空間的に非均等に放出されるという点である。

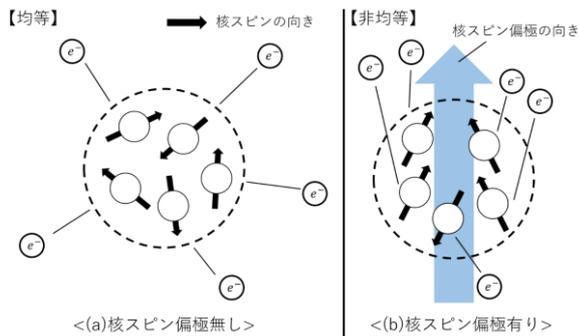


図2 β崩壊における模式図

(b)に示すように核スピンの向きが揃える(核スピンの偏極)ことができると、β線の放出が非対称になる。そこで、β-NMR法では核スピンの偏極した不安定原子核からの非対称に放出されるβ線を観測することにより、核磁気モーメントを測定している。測定原理の詳細については以下に述べる。

β線の放出速度を v 、高速を c 、偏極度を P 、核スピンの偏極の向きとβ線の成す角度を θ 、とおくとβ線の非対称な放出角度分布 $W(\theta)$ は次式で表される[12]。

$$W(\theta) = 1 + \frac{v}{c} A_{\beta} P \cos \theta \quad (3)$$

A_{β} は非対称パラメーターを表し、β崩壊の許容遷移の型に依存する量となる。

β-NMR法では核スピンの偏極した不安定核を垂直方向に印加された静磁場中に入射する。β線検出器は上下に設置されており、静磁場軸に対して垂直方向に振動磁場を印加する。このように核スピンを反転させ共鳴周波数を求める手法を高速断熱通過法[13]と呼ぶ。

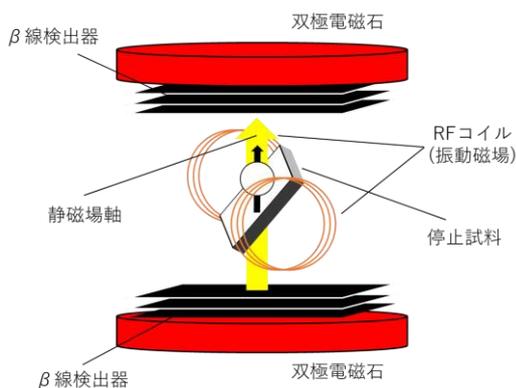


図3 静磁場中に入射された不安定核原子

この時、図4に示すように原子核に印加する磁場のうちZ軸方向成分を有効磁場 $B_{eff} = B_0 - \omega/\gamma$ と呼び、X軸方向成分を実行磁場 $B_1 = B_{1cp}$ と呼ぶ。 B_{eff} と静磁場 B_0 の成す角度を θ とおき、その関係は次式で表わせられる。

$$\cos \theta = \frac{B_{eff}}{\sqrt{B_{1cp}^2 + B_{eff}^2}} = \frac{B_0 - \omega/\gamma}{\sqrt{B_{1cp}^2 + (B_0 - \omega/\gamma)^2}} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_{eff}} \quad (4)$$

(4)式より振動磁場の周波数を ω 、原子核の共鳴周波数を ω_0 、有効磁場の周りを原子核が歳差運動する角速度を ω_{eff} とおいた。

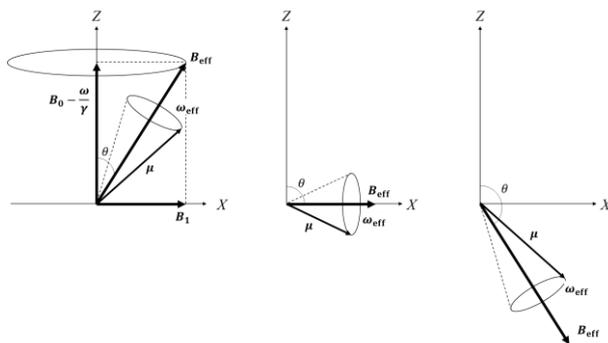


図4 高速断熱通過法におけるスピン反転

振動磁場を $\omega = \omega_0$ を通るように周波数掃引すると、有効磁場 B_{eff} と静磁場 B_0 の成す角度を θ は大きくなり、有効磁場 B_{eff} は回転系で見ると倒れていく。 $\omega = \omega_0$ は共鳴周波数を意味しており、有効磁場 B_{eff} は振動磁場 B_{1cp} に等しくなる。更に周波数を大きくしていくと有効磁場は静磁場に対して逆向きの成分が表れ、反転していく。従って有効磁場 B_{eff} の周りをLarmor歳差運動している磁気モーメントも反転していく。よって不安定核が固有に持つ共鳴周波数を含むRF振動磁場が印加されると共鳴が起き核スピンの偏極の向きが反転する。

β-NMR法ではこのスピン反転の原理を利用してβ線を計数している。

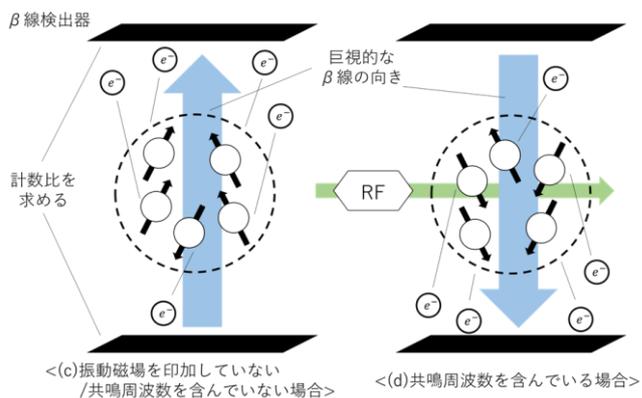


図5 静磁場中の核スピンの偏極の反転

この反転によって(c)と(d)の場合でβ線検出器の計数比に変化が生じる。以下に $v/c \approx 1$ として(c)を R_{off} 、(d)を R_{on} としてβ-NMR法における計数比を示す。

$$R = \frac{R_{on}}{R_{off}} = \left(\frac{1 - A_{\beta} P}{1 + A_{\beta} P} \right)^2 \approx 1 - 4A_{\beta} P \quad (5)$$

共鳴周波数を含む高周波磁場が印加及び掃引されるとβ線の計数比が変化する。共鳴周波数 ω_0 は測定対象となる核のg因子を用いて以下のように導出される。

$$\omega_0 = \frac{g\mu_N B_0}{\hbar} \quad (6)$$

以上より、共鳴周波数を測定することで実験対象核のg因子を求めることができ、(1)式より磁気双極子モーメント μ を測定することができる。

ただしスピン反転を行うためには周波数掃引速度 $\dot{\omega}$ によるスピンの角度変化が速過ぎると、核磁気モーメントの歳差運動がその変化に対して追従できず、スピン反転が起きない。そのため、スピンの角度変化が磁気モーメントの歳差運動と比較して十分遅くなくてはならず、この条件を断熱条件と呼ぶ。 $\dot{\omega}$ とBの間には、以下の関係がある。

$$K \frac{\sqrt{\dot{\omega}}}{\gamma} = B_{1cp} \quad (7)$$

γ は磁気回転比と呼ばれ角運動量に対する磁気双極子モーメントの比を表す。K値とスピン反転率の関係は過去の実験から算出されており以下に示す関係がある。

表1 K値とスピン反転率の関係

K 値	1.2	1.7	2.2
スピン偏極保持率	80 %	90 %	98 %

更に周波数掃引において、以下の問題が生じる。 β -NMR測定では一定幅で掃引して共鳴周波数を探索するが、この掃引幅の末端に共鳴周波数が存在していた場合、その振動磁場の印加直後に急に共鳴が起るため、スピンの角度が急激に変化する。それが原因となりスピンの角度変化に付いていけず偏極が崩れ、共鳴が得られなくなる。また掃引終了部分に共鳴周波数が存在すると、同様の理由で共鳴が得られなくなる。この問題に対処するために振動磁場強度を徐々に上げることで振動磁場の急激な変化を抑えている。即ち任意波形発生器から出力する波形は台形となるように振幅電圧を掃引している。台形波の立上がり、一定、立下り部分の時間軸の比は1:10:1と設定した。

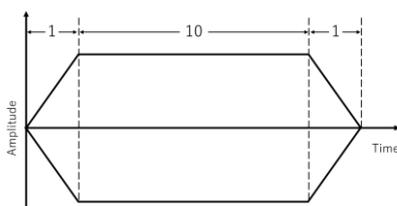


図6 振動磁場の台形波

(3) 電気四重極相互作用

原子核は静磁場 B_0 及び電場勾配 q が無い場合は各磁気量子数間のエネルギーは縮退している。静磁場 B_0 のみ印加されている場合は核磁気共鳴法によって共鳴周波数 ω_0 の探索を行い、g因子を求めることができる。更に静磁場 B_0 と電場勾配 q の両方が存在する場合は核四重極モーメント Q が求められる。以下に核スピンの $I = 5/2$ の場合のエネルギー準位図を示す。

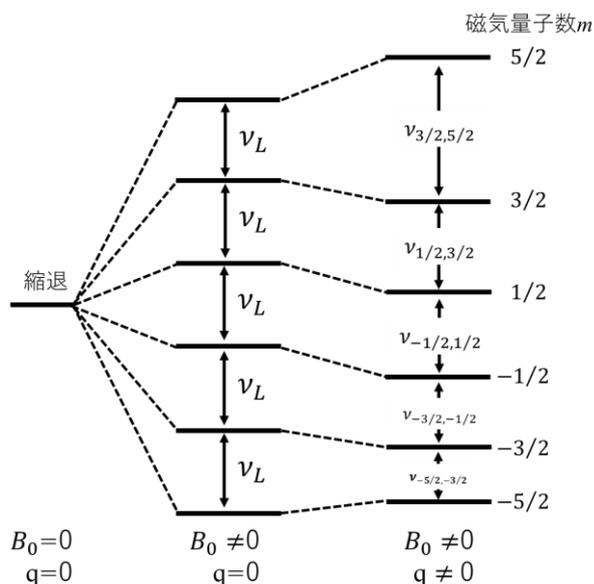


図7 $I=5/2$ の場合のエネルギー準位図

図7が示すQモーメント測定における各磁気副準位間の共鳴周波数は次式で表わせられる。

$$\nu_m, \nu_{m+1} = \nu_L - \nu_Q \cdot \frac{3(3\cos^2\theta - 1)(2m + 1)}{8I(2I - 1)} \quad (8)$$

この時の基底状態における各磁気量子数の分布図は次式で表わせられる。

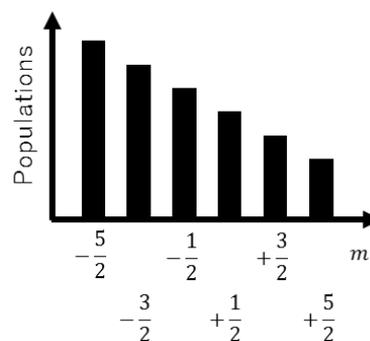


図8 基底状態の分布図

(8)式に示した各共鳴周波数を印加し、図8の分布図を反転させβ線非対称放出を計数することでQモーメントは測定される。測定には2種類の手法をとっている。

a) 時系列法

1 回の RF 照射時間内に全ての準位間の周波数を時系列的に印加していく方法である [7], [14]。核スピン I に対して

$$\left(\sum_{n=1}^{2I} n \right) \text{ 回} \quad (9)$$

だけ印加すれば良い。図 9 のように 5 種類の RF を (1→2→3→4→5→1→2→3→4→1→2→3→1→2→1) の計 15 回印加すればよい。

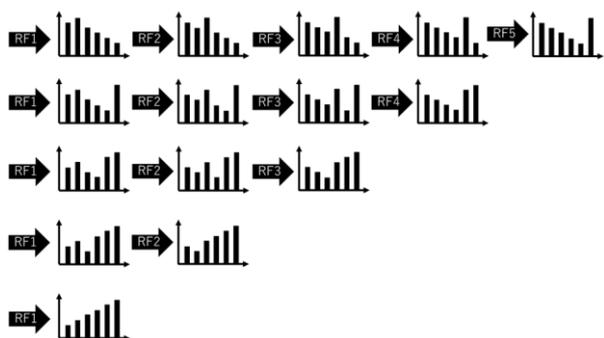


図 9 時系列法における RF を印加する順番

時系列法の利点は断熱条件を満たしていれば完全反転が成される点である。一方で RF の印加時間が非常に長くなるため、短寿命の不安定核には適さないという問題がある。

b) 混合周波数法

RF 照射時間を短縮するために複数の RF を一度に印加する混合周波数法がある [9]。

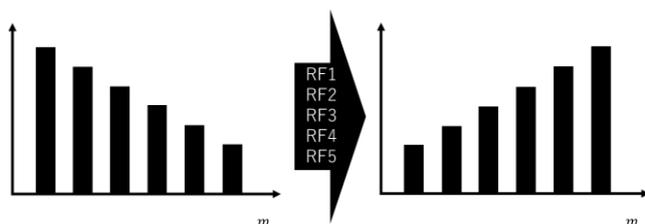


図 10 混合周波数法における RF の掛け方

混合周波数は短寿命の不安定核を対象とした測定に適している。また、1 シーケンスが短いため時系列法よりも多いデータの蓄積が可能となる。一方で任意波形発生器の出力振幅電圧は決まっているため、一つ当たりの正弦波の振幅電圧は小さくなる。これは増幅器を使用することで解決できる。

3. 開発の課題

本実験では中性子過剰核を対象として β -NMR 法により核電磁気モーメントの測定を行っている。この核電磁気モーメントを導出するために g 因子及び Q モーメントを測定することを目的としている。特に Q モーメント測定では複数の高周波磁場を合成した上で不安定核の寿命より十分短い時間内にシーケンスを組むことが必須となる。今回、我々の研究の目的に最適な FPGA(Field Programmable Gate Array) ベースの任意波形発生器 TCV-281-W (多摩川電子社製) を導入し、新型磁場印加システムの開発を行った。



図 11 多摩川電子社製の任意波形発生器 TCV-281-W

(1) 従来の問題と開発の目的

RF 磁場を印加するための交流電圧をより正弦波に近い信号を出力することで、測定精度を上げることができる。加えて貴重なビームタイム中に効率の高い測定をするためには、装置の伝達速度を高速化することが必要となる。また Q モーメント測定では混合周波数法を行うため台形波を合成して出力するため、複雑な高周波シーケンスを必要とする。

従来使用していた任意波形発生器は Tektronix 社製の AWG615 と NF ブロック社製の WF1974 である。前者は台形波の合成ができるが、台形波を構成するコマンドを逐一送受信していたため伝達速度が遅いという理由により現在はほとんど使用されていない。代わりに 2012 年度から導入された後者を使用している。WF1974 は高い振幅分解能を備えており、伝達速度が速い。一方で台形波の合成をすることができず、単一の RF しか出力することができない。このため Q モーメント測定の混合周波数法を行うことはできない。またトリガーが一つしかないため、PSG と任意波形発生器とのシーケンステーブルにずれが生じる問題が残っていた。それぞれの特徴と問題点を以下に示す。

表 2 各任意波形発生器の特徴と問題点

	特徴	問題点
AWG615	正弦波の合成が可能	正弦波の精度が低い
		コマンドの伝送速度が遅い
WF1974	正弦波の精度が高い	正弦波の合成が不可能
	コマンドの伝送速度が速い	トリガーが一つしかない

表 2 に示した問題点を解決した新型任意波形発生器

TCV-281-W はより正弦波に近い波形を出力でき、2つのトリガーを使用しているためシーケンステーブルにずれが生じない仕様となっている。コマンドは任意波形発生器に搭載された FPGA に書き込むことで混合周波数法を行うための複雑な高周波シーケンスの出力が可能となり、かつ伝達速度を高速化することができる。

(2) シーケンスとトリガーの組み方

TCV-281-W と WF1974 のそれぞれのトリガーの掛け方について述べる。PSG からは台形波を順番に出力させる命令として RF trigger、台形波の順番を初期化する命令として RF jump が用意されている。以下に各任意波形発生器を使用したシーケンスの例を示す。

a) WF1974 を使用したシーケンス

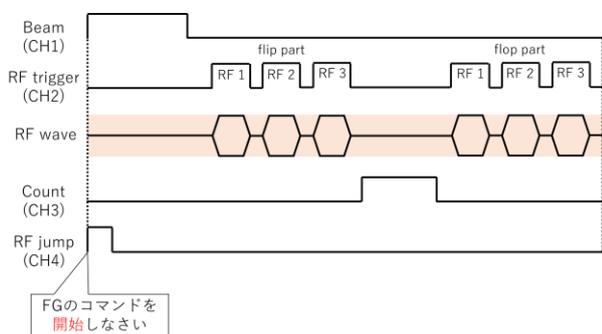


図 12 WF1974 を使用したシーケンスの例

WF1974 はトリガー入力端子を一つしか持っていない。そのため従来は RF jump のみからトリガーを入力して任意波形発生器 (FG) を稼働していた。よって WF1974 に送るためのコマンドはシーケンステーブル全体 (図 10 中の ■ の部分) を送らなければならなかった。

b) TCV-281-W を使用したシーケンス

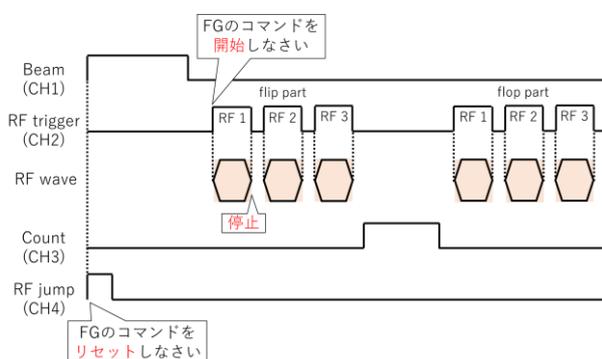


図 13 TCV-281-W を使用したシーケンスの例

TCV-281-W は図 11 中の ■ の部分のみのコマンドを送信すれば良い。TCV-281-W は PSG の RF jump を入力することで、FG の台形波を出力するコマンドを初期化 (リセット) する。その後、RF trigger が FG に入力され

ることで初めて台形波 RF1 が出力される。台形波は設定時間が終了すると、自ら出力を停止し、次の RF trigger が入力されるまで待つ。そして、再び RF trigger が入力されると RF2 を出力する。

以上の TCV-281-W のトリガーの掛け方を使用して新型磁場印加系システムの開発を行った。

4. ^{21}F 核の g-factor 測定実験の結果と考察

新型任意波形発生器 TCV-281-W は本来、 β -NMR 実験における Q モーメント測定に向けた時系列法と混合周波数法に適用することになっている。その前に当任意波形発生器が正常に動作するか性能評価を行った。

(1) 実験の目的

本実験は新型任意波形発生器 TCV-281-W の性能評価を行った。比較のために従来の任意波形発生器 WF1974 も使用し、同様の実験セットアップを用いて測定を行った。評価方法は ^{21}F 核を対象とし、従来型及び新型それぞれのシステムを使用して g 因子を測定し比較検討を行った。本実験結果から新型システムは従来型システムと誤差の範囲内で一致する g 因子が測定されれば、新型システムは有効であると判断する。

(2) 実験装置のセットアップ

^{21}F 核を生成するためには理化学研究所 RI ビーム生成分離装置 RIPS (RIKEN Projectile Fragment Separator) を使用した [15]。 ^{21}F 核を対象とした g 因子の測定では先程の図 3 に示した装置を使用した。 β 線検出器としてプラスチックシンチレーターを上下に 3 台ずつ設置し、発する光を光電子増倍管で検出する。中央には振動磁場を印加するための RF コイルと ^{21}F 核を停止させる stopper (停止試料) が設置されてある。

表 3 実験装置のセットアップ

2次ビーム	^{21}F
停止試料	CaF_2
停止試料の角度	45°
コイルの巻き数	3×3

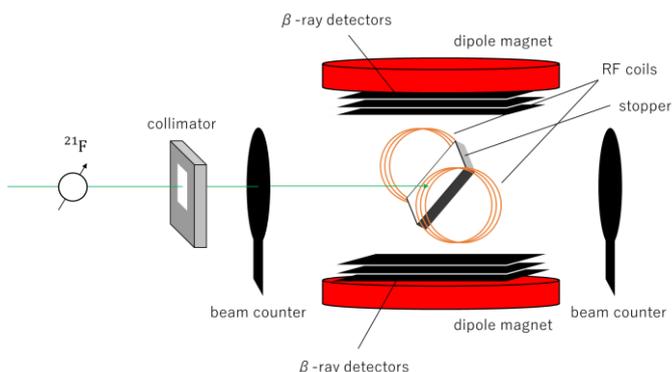


図 14 実験装置のセットアップ

図 14 中の collimator は ^{21}F 核の進行方向をそろえるために、beam counter は ^{21}F 核が停止試料の中央に入射されたのかを確認するために使用した。

(3) 共鳴周波数の測定結果と考察

測定は WF1974(従来型)と TCV-281-W(新型)のそれぞれのシステムを用いた場合で、測定周波数に対する β 線非対称度($R = R_{on}/R_{off}$)を測定した。実際の測定ではそれぞれのシステムを使用して測定①、②、③の3段階で計6回行った。測定①、②では共鳴周波数付近を探索する測定を行い、測定③で共鳴周波数を求めた。本紀要では測定③の結果のみ載せる。

測定③では 4158.15 kHz から 4199.94 kHz の間で7つの周波数領域を掃引して測定を行った。以下にそれぞれの測定結果を示す。

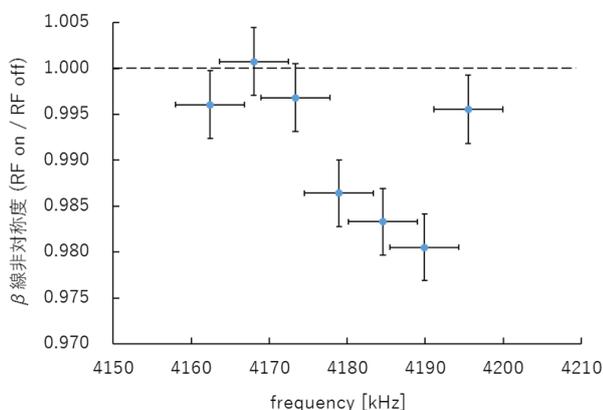


図 15 WF1974 を使用した測定結果

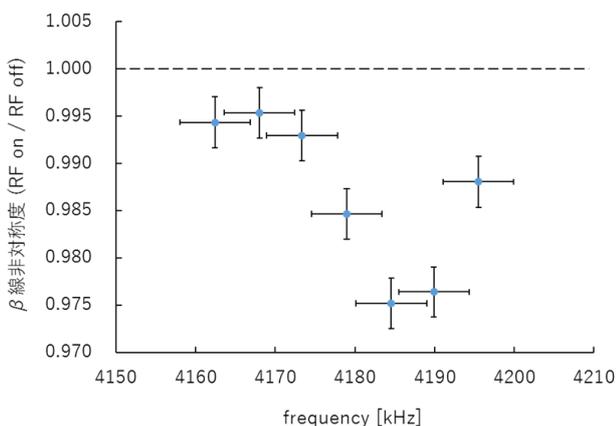


図 16 TCV-281-W を使用した測定結果

測定③における図 13 と図 14 を用いて共鳴周波数から g 因子を導出するためにガウス関数へのフィッティングを行った。横軸は(6)式を用いて周波数から g 因子に変換した。 g 因子を g 、ガウス関数を $R(g)$ として、ピークを R_0 、中心値を g_0 、幅を Δg 、オフセットを R_{offset} 、として次式で表す。

$$R(g) = R_0 \cdot \exp\left[-\frac{(g - g_0)^2}{2 \cdot \Delta g^2}\right] + R_{offset} \quad (10)$$

図 13 と図 14 の測定結果に(10)式が示すガウスフィッティングを行ったパラメーターを以下に示す。

表 4 ガウスフィッティングのパラメーター

	WF1974 (従来型)	TCV-281-W (新型)
R_0	-0.019(4)	-0.0212(7)
g_0	1.5690(5)	1.5692(1)
Δg	0.0024(7)	0.0023(1)
R_{offset}	0.999(3)	0.9950(5)

表 4 のパラメーターを使用し、(6)式で示した横軸を周波数から g 因子に変換したガウスフィッティングを示す。尚、静磁場は $B_0 = 3500 \text{ G}$ とした。

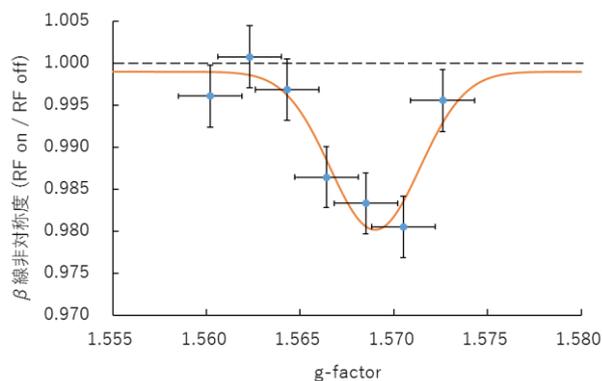


図 17 WF1974 を使用したガウスフィッティング

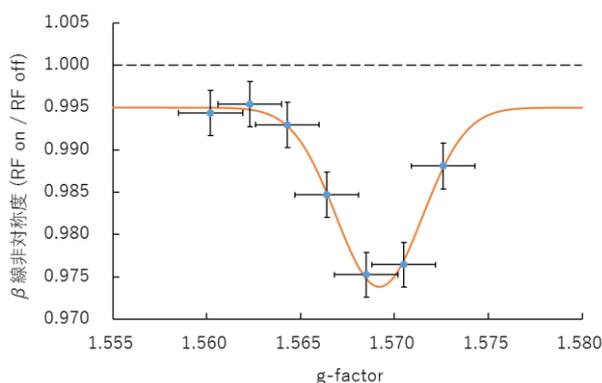


図 18 TCV-281-W を使用したガウスフィッティング

図 15 と図 16 を比較すると、後者の TCV-281-W を使用した場合には、バックグラウンドが含まれていた。つまり、 β 線非対称度が 1 になるはずの領域で 0.5 % の非対称性が現れていた。この原因は WF1974(従来型)では RF の振幅電圧を 2 Vpp、TCV-281-W(新型)では RF の振幅電圧を 5 Vpp と設定していたからである。

後者の TCV-281-W では RF 磁場強度が相対的に大きすぎた。この強磁場によって対称性が現れないはずの周波数領域でも核スピン偏極を反転させてしまい、共鳴が起き、 β 線の非対称度を検出してしまった。

バックグラウンドを差し引くと図 15 と図 16 に施したガウスフィッティングではほぼ同じ形状のスペクトルが得られた。定量的に解析するために、表 4 よりそれぞれの g 因子の測定結果を $g_0 + \Delta g$ と表し、比較のため 1999 年に行われた β -NMR 実験での同様の測定結果 1.5678(5) を文献値として以下に示す[16]。

表 5 g 因子の測定結果

	g 因子
文献値[16]	1.5678(5)
WF1974 (従来型)	1.569(3)
TCV-281-W (新型)	1.569(2)

既知の ^{21}F 核の g 因子が 1.5678(5) であることに対して、従来の任意波形発生器 WF1974 を用いた測定結果 1.569(3) の誤差範囲と同様に、新型任意波形発生器 TCV-281-W を用いた測定結果 1.569(2) の誤差範囲が重なる結果となった。両測定結果は極めて近い値を示したため、新型システムは従来型システムと同程度の g 因子を測定できると判断した。以上より新型システムが β -NMR 実験において有効であると判断した。

5. 今後の展望

本実験から TCV-281-W を使用した新型磁場印加系システムは、従来型システムと同程度の測定ができると判断した。しかし両任意波形発生器を使用した実験では異なる条件で測定したため、共鳴が現れないはずの領域で β 線非対称性が生じてしまった。よって再度条件を一致させて測定を行う必要がある。今後の測定では、振幅電圧、測定時間、測定手順を一致させて再度実験を行い、測定結果の比較検討を行う必要がある。

今後は当新型任意波形発生器 TCV-281-W を Q モーメント測定に適用する。時系列法及び混合周波数法を用いて従来型システムとの測定精度や時間短縮化の比較検討を行う。この Q モーメントを測定することで中性子過剰領域における系統的变化を解明する。

参考文献

- 1) Sorlin, O.: Nuclear magic number: new features far from stability, Progress in Particle and nuclear Physics vol. 61, 602, 2008.
- 2) Ueno, H. et al.: Magnetic moment of $^{39}_{13}\text{Al}_{17}$ and $^{32}_{13}\text{Al}_{19}$, Physics Letters B vol. 615, 186, 2005.
- 3) Kameda, D. et al.: Measurement of the electric quadrupole moment of ^{32}Al , Physics Letters B vol. 647, 93, 2007.
- 4) Nagae, D. et al.: Ground-state electric quadrupole moment of ^{31}Al , Physical Review C vol. 79, 027301, 2009.
- 5) Shimada, K.: Erosion of $N = 20$ shell in ^{33}Al investigated through the ground-state electric quadrupole moment, Physics Letters B vol. 714, 246, 2012.
- 6) 白井葉月: 修士論文「中性子過剰核 S 同位体の核磁気モーメント」, 東京工業大学大学院, 2014
- 7) Nagae, D. : Electric quadrupole moment of ^{31}Al , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 266, 4612, 2008.
- 8) 吉田直貴: 修士論文「 β -NMR 実験に向けた新型 RF 制御系・データ収集系の開発」, 東京工業大学大学院, 2013
- 9) 鈴木孝幸: 修士論文「中性子過剰核 ^{17}B の電気四重極モーメントの測定」, 東京工業大学大学院, 1999
- 10) 八木 浩輔: 原子核物理学 朝倉書店 1971 年
- 11) Sugimoto, K.: Journal of the Physical Society of Japan vol 21, 213, 1966.
- 12) Morita, M.: Beta Decay and Muon Capture.
- 13) Abragam, A.: The principles of nuclear magnetism.
- 14) 長江大輔: 博士論文「Electric Quadrupole Moment of Neutron-rich Aluminum Isotopes」 東京工業大学大学院, 2008
- 15) Kubo, T. et al.: The RIKEN radioactive beam facility, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 70, 309, 1992.
- 16) Matsuta, K. et al.: Electromagnetic moments of short lived β emitters ^{21}F , ^{23}Mg , ^{27}Si , and ^{39}Ca , Hyperfine Interactions vol. 120/121, 673, 1999.