

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月 1日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21310038

研究課題名（和文） 粒子識別型マイクロシメトリシステムPID-TEPCの開発

研究課題名（英文） Development of particle identifying microdosimetry system tissue equivalent proportional counter (PID-TEPC)

研究代表者

遠藤 暁 (SATORU ENDO)

広島大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90243609

研究成果の概要（和文）：組織等価型ガス比例計数管（TEPC）に半導体検出器（SSD）とプラスチックシンチレーションカウンターを組み合わせた PID-TEPC システムを改良し測定試験を行った。SSD の厚みは以前の $500\mu\text{m}$ から $700\mu\text{m}$ に変更し、粒子識別能の向上を目指した。性能は、広いエネルギー分布を持つ炭素線 SOBP ビームを用いて、粒子識別能の評価とマイクロシメトリスペクトルの同定を行った。その結果、陽子、ヘリウム、リチウム、ベリリウム、ボロン、炭素及び中性子の同定しマイクロシメトリスペクトルを決定できることを示した。この方法で、同定した中性子成分は、mono エネルギー炭素線がファントム内で発生する収量より多い傾向を示した。そのため、中性子の同定精度を考察するため、ビームモデレータで発生する中性子エネルギースペクトルの測定評価もあわせて行った。

研究成果の概要（英文）：A PID-TEPC which consist of tissue equivalent proportional counter (TEPC) and solid state detector (SSD) system was improved and tested. The SSDs were changed from $500\mu\text{m}$ to $700\mu\text{m}$ to improve the particle identification resolution. This system was tested with spread out Bragg peak (SOBP) carbon beam. Microdosimetric spectra of fragment particles were measured by this system. As the result of this test, microdosimetric spectra of proton, helium, lithium, beryllium, boron, carbon and neutron could be obtained separately. Neutron component obtained by this system was higher than that produced in a body simulated phantom by mono-energy carbon beam. Therefore, neutron energy spectrum produced in SOBP beam moderator has been also measured.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,600,000円	1,080,000円	4,680,000円
2010年度	1,500,000円	450,000円	1,950,000円
2011年度	1,600,000円	480,000円	2,080,000円
年度			
年度			
総計	6,700,000円	2,010,000円	8,710,000円

研究分野：放射線物理学、放射線生物物理学、医学物理学

科研費の分科・細目：環境学・放射線・化学物質影響科学

キーワード：マイクロシメトリ、TEPC、重イオン、フラグメント、粒子識別

1. 研究開始当初の背景

一般に、組織等価比例計数管は粒子識別ができず全粒子のエネルギー付与スペクトルとして測定される。しかしながら、粒子線治療や宇宙環境においては、多種類の粒子線が混在し、各々の線質が問題とされる。また、このような環境下では、高エネルギー中性子の線質も大きく寄与してくる。高エネルギー粒子線治療の治療成績向上のためには、粒子線が生成するフラグメント中の荷電粒子はもとより、中性子成分の線質・線量の評価も不可欠であるが、これまではあまり行われてこなかった。荷電フラグメントと比較した場合、中性子フラグメント成分は、線量コントロールが難しいため、線量評価されていないのが現状である。

本課題申請者は、放医研 HIMAC からの炭素線のマイクロシメトリとして、生成フラグメント粒子ごとのマイクロシメトリを行ってきた。これまで行ってきた経験をもとに、組織等価型比例計数管 (TEPC) とシリコン検出器を併用し、粒子識別を可能とする組織等価比例計数管 : PID-TEPC を開発する。本研究で目指す測定システム PID-TEPC は、粒子を識別して線質を評価できるため、放射線治療場で生成される中性子成分の生体組織への影響や宇宙放射線場での中性子成分の被ばく線量評価も行うことが可能となる。

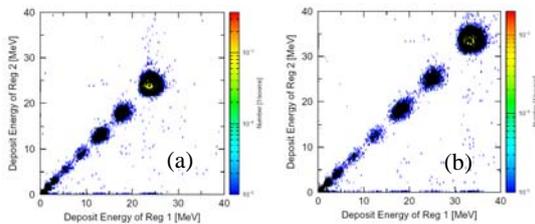


図 1 モンテカルロ計算によるエネルギー分解能 (a) 500 μm 厚、(b)700 μm 厚

2. 研究の目的

組織等価型比例計数管 (TEPC) とシリコン

検出器を併用し、粒子識別を可能とする組織等価比例計数管 : PID-TEPC システムを改良し、同定精度の向上と、測定システムの一体化を行う。

3. 研究の方法

放医研 HIMAC 炭素ビームのマイクロシメトリを行ってきた。これまで、SSD は、500 μm PIPS 検出器 2 式を用いていたが、この検出器では TEPC との一体化が困難であった。そこで、新しく 2 枚の SSD を 1 つのハウジングに収めたデュアル SSD、SSD 厚さ 700 μm を特注し、併用する事とした。モンテカルロ計算では、20-30% 程度分解能が向上することが期待された。クロストークや電気ノイズの試験を行いノイズノイズ対策を施し、TEPC と一体化する治具を作成した。

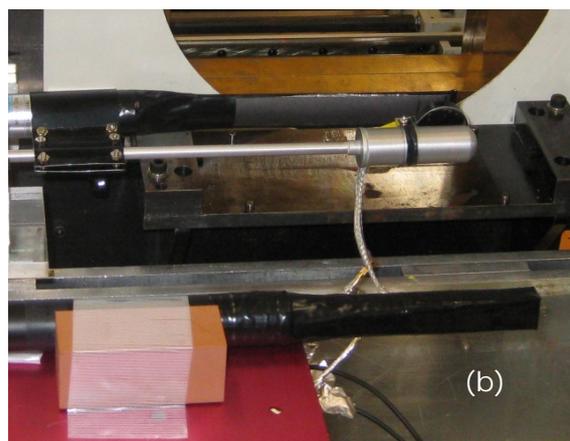
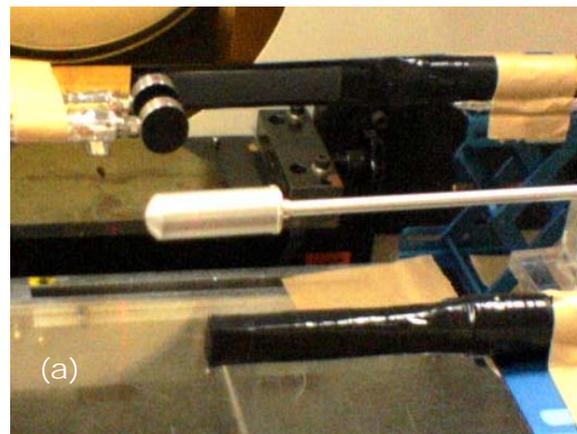


図 2(a)改良前、(b)改良後

改良前と改良後の写真を図 2(a)、(b)に示す。(a)では 2 つの検出器を並べているのに対し、(b)では 2 枚の SSD を 1 つのハウジングに TEPC 自身に固定できている。

4. 研究成果

荷電粒子識別能

700 μm 厚に変更した事からエネルギー分解能が 30%程度改善すると期待されたが、10%程度にとどまった。しかしながら、炭素線及びフラグメントの粒子識別には、十分であった。粒子識別の例を図 3 に、粒子識別の情報からフラグメント粒子ごとに決定したマイクロドシメトリスペクトルを図 4 に示す。

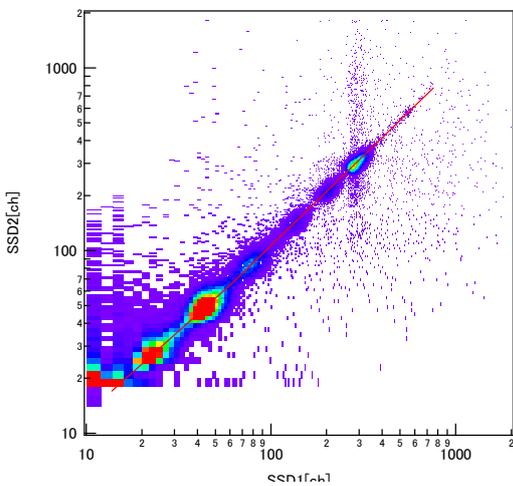


図 3 荷電粒子識別の例

中性粒子識別能

一方、中性子同定に関しては中性粒子の識別に利用するヴェトカウンターのヴェト効率の測定を行った。図 5 にヴェト効率を示す。

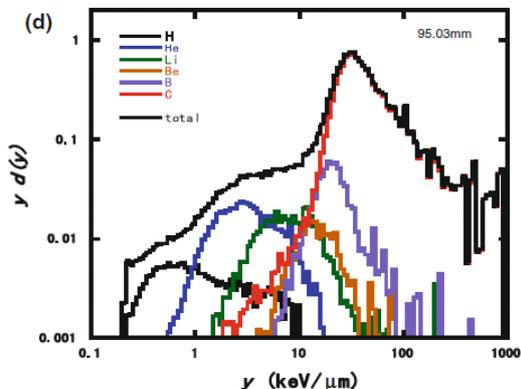


図 4 粒子識別を利用し粒子種ごとにマイクロドシメトリスペクトルを決定した例

プロットは、ヴェトカウンタと TEPC の同時計数率から求めたヴェト効率、実線は TEPC 有感部とヴェトカウンタの幾何学的重なりから推定したものである。この 2 つはよく一致しており、十分なヴェト効率を得られる事を示している。

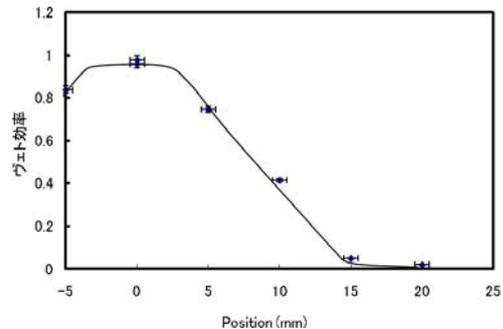


図 5 ヴェト効率の実測と計算

2 次中性子エネルギースペクトル

HIMAC・生物コースにおいて、機器の少ない角度 21° に液体シンチレーションカウンタを設置し、中性子の TOF を測定した。測定は、リッジフィルター・散乱体・ワブラー ON/OFF について行い、生成される中性子の計数率、及び中性子エネルギースペクトル決定用 TOF 測定を行った。解析時に必要となる、時間 0 校正を行うため、リッジフィルターの位置に、厚み 8cm の炭素ターゲットを設置し γ 線の測定も合わせて行った。中性子の同定には、veto 手法及び PSD (波形弁別) 手法を利用した。

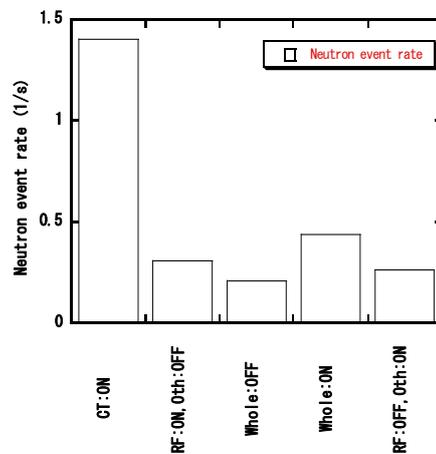


図 6. 中性子の事象計数率

中性子事象を抽出し、測定時間で除することで、中性子事象の計数率を求めた。結果を、図6に示す。図中の whole : ON/OFF は、リッジフィルター・散乱体・ワブラーの全ての ON/OFF を示す。また RF : ON, other : OFF, RF : OFF, other : ON はリッジフィルターと散乱体・ワブラーの ON/OFF を入換えたことを、CT : ON は炭素ターゲット ON を示す。中性子事象計数率は、モデレータの ON/OFF に応答しており、モデレータが中性子発生を引き起こしていることがわかる。

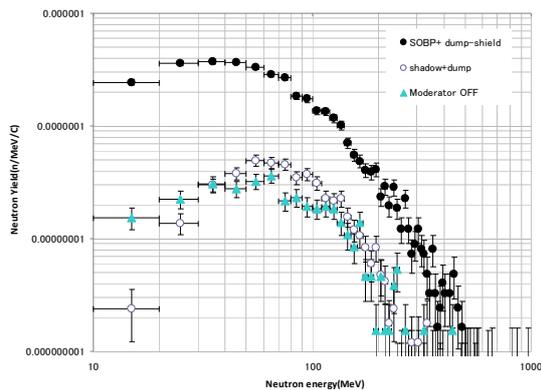


図7 中性子スペクトル。●/▲ : リッジフィルター・散乱体・ワブラーの全ての ON/OFF。○ : 150cm 厚のスチールシャドバー測定。

得られた中性子エネルギースペクトルを SINFUL-QMD で求めた測定効率で補正したものを図7に示す。●は、モデレータ ON、○はシャドバー測定、▲はモデレータ OFF を示す。シャドバーの結果より、散乱線の寄与は 1/10 手度であることがわかる。またモデ

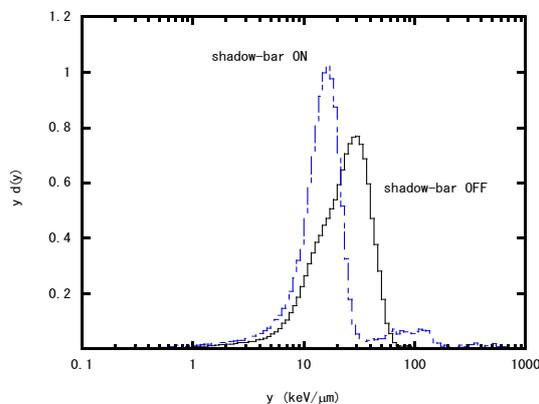


図8 中性子マイクロドシメトリスペクトル。実線 : SOBP ビーム、鎖線 : シャドバー測定。

レータの ON/OFF に対して中性子の収量が 1 桁程度異なることから、ビームモデレータにより 2 次中性子が発生していることが確認できる。炭素線入射当たりの 2 次中性子イールドは、測定領域で積分すると 8×10^{-7} (n/C) であった。

エネルギー分布測定位置におけるマイクロドシメトリシングルイベントスペクトルを図8に示す。モデレータで生成された 2 次中性子は、リニアエネルギー $30 \text{ keV}/\mu\text{m}$ にピークを持つが、シャドバー測定では $6 \text{ keV}/\mu\text{m}$ にピークを持ち、 γ 線由来と考えられる。また、このスペクトルにおいて、 $100 \text{ keV}/\mu\text{m}$ の事象は、低エネルギー (1MeV 以下) の中性子による事象を示すと考えられる。

まとめ

本研究の成果として、SSD と TEPC を一体物とし、PID-TEPC システムのプロトタイプとした。その性能は、以前の測定体系で用いていた 2 式の SSD と同等以上の荷電粒子識別能が得られた。また、本システムの中性子同定性能について評価するとともに、2 次中性子線の測定を行った。

これらのことから、粒子識別型ガス比例計数管システム (PID-TEPC システム) は、利用に十分な性能を有していると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

1. H. Baba, Y. Onizuka, M. Nakao, M. Fukabori, T. Satoh, Y. Sakurai, H. Tanaka, S. Endo, Microdosimetric evaluation of neutron field for BNCT at Kyoto university reactor by using the PHITS code, Radiat. Prot. Dos. 143, 528-532, 2011. (査読有)
2. Y. Yang, T. Kurokawa, Y. Takahama, Y. Nindita, S. Mochizuki, K. Arakawa, S. Endo and H. Kinashi, pSLA2-M of *Streptomyces rochei* Is a Composite Linear Plasmid Characterization by Self-Defense Genes and Homology with pSLA2-L, Biosci. Biotechnol. Biochem.

- 75(6), 1147-1153, 2011. (査読有)
3. Y. Kojima, H. Hayashi, M. Shibata, S. Endo, K. Shizuma, A. Taniguchi A spectrometer for lifetime determination by β - γ - γ delayed coincidence technique at KUR-ISOL, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 659 (2011) pp. 193-197. (査読有)
 4. K. Tanaka, S. Endo, M. Hoshi, Measurements of neutron distribution in neutrons-gamma rays mixed field using imaging plate for neutron capture therapy, Appl. Radiat. Isot. 68, 207-210, 2010. (査読有)
 5. A. Murataka, S. Endo, Y. Kojima and K. Shizuma, Dose Rate Estimation around a ^{60}Co Gamma-ray Irradiation Source by means of $^{115\text{m}}\text{In}$ Photoactivation, J. Radiat. Res. 51, 197-203, 2010. (査読有)
 6. S. Endo, M. Takada, H. Tanaka, Y. Onizuka, K. Tanaka, N. Miyahara, H. Baba, A. Oishi, M. Ishikawa, M. Hoshi, S. Kimura, M. Minematsu, Y. Morimune, Y. Kojima, K. Shizuma, Measurement of microdosimetric spectra produced from a 290 MeV/n Spread Out Bragg Peak carbon beam, Radiat Environ Biophys. 49:469-475, 2010. (査読有)
 7. S. Mizukami-Murata, H. Iwahashi, S. Kimura, K. Nojima, Yo. Sakurai, T. Saitou, N. Fujii, Y. Murata, S. Suga, K. Kitagawa, K. Tanaka, S. Endo, M. Hoshi, Genome-Wide Expression Changes in *Saccharomyces cerevisiae* in Response to High-LET Ionizing Radiation, Appl Biochem Biotechnol, 162:855-870, 2010. (査読有)
 8. K. Ono, S. Endo, K. Tanaka, M. Hoshi, Y. Hirokawa, Dosimetric verification of the anisotropic analytical algorithm in lung equivalent heterogeneities with and without bone equivalent heterogeneities. Med. Phys. 37 (8), 4456-4463, 2010. (査読有)
 9. A. Sakaguchi, K. Kawai, P. Steier, T. Imanaka, M. Hoshi, S. Endo, K. Zhumadilov, M. Yamamoto, Feasibility using ^{236}U to reconstruct close-in fallout deposition from the Hiroshima Atomic Bomb, Sci. Tot. Environm 408, 5392-5398, 2010. (査読有)
 10. S. Endo, K. Tanaka, K. Fujikawa, T. Horiguchi, T. Itoh, Y. Onizuka, M. Hoshi, A. Murataka, Y. Kojima and K. Shizuma, Microdosimetry on a Mini-Reactor UTR-KINKI for Educational Uses and Biological Researches, J. Radiat. Res. 50, 83-87, 2009. (査読有)
 11. R. Rakwal, G. K. Agrawal, J. Shibato, T. Imanaka, S. Fukutani, S. Tamogami, S. Endo, S. K. Sahoo, Y. Masuo, and S. Kimura, Ultra low-dose radiation: Stress responses and impacts using rice as a grass model, Int. J. Mol. Sci. 10, 1215-1225, 2009. (査読有)
 12. A. Murataka, Y. Kojima, S. Endo and K. Shizuma, A string-guide fast transport system and photoactivation of short-lived isomers $^{79\text{m}}\text{Br}$ and $^{77\text{m}}\text{Se}$ by ^{60}Co γ -ray irradiation, Nucl. Instrum. Meth. A610, 654-659, 2009. (査読有)
- [学会発表] (計 8 件)
1. S. Endo, Estimation of Beta-ray Skin Dose from Fission Fallout. RERF International Workshop on Potential Improvements to Organ Dose Calculation for the Atomic Bomb Survivors Using DS02 Fluences, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima, Japan, March 7 and 8, 2011.
 2. S. Endo, T. Imanaka, M. Sugai, S. Ozawa, K. Shizuma, Interim Report on Radiation Survey in Iitate Village area, IUPAC International Congress on Analytical Sciences 2011, Kyoto, Japan, May 22-26, 2011.
 3. 遠藤 暁, 富田順平, 田中憲一, 山本政義, 福谷 哲, 今中哲二, 天野 光, 川村秀久, 河村日佐男, 星 正治, 旧ソ連核実験場近郊ドロン村から採取した土壌試料中 ^{129}I 汚染量の測定, 日本原子力学会講演要旨集, 2009. 3. 23-25, 東京.
 4. 遠藤 暁, 高田真志, 田中浩基, 鬼塚昌彦, 田中憲一, 宮原信幸, 星 正治, 石川正純, 木村真三, 静間 清, 炭素SOBPビームおよび生成フラグメント粒子のマイクロドシメトリ, Jpn. J. Med. Phys. 29 suppl 2, 133-134, 2009. 4. 9-11, 横浜.
 5. 木村真三, 遠藤 暁, 明後隆大, 片山清秀, 静間 清, IVR治療・診断照射における空間線量率・被ばく線量推定, Jpn. J. Med. Phys. 29 suppl 2, 300-301, 2009. 4. 9-11, 横浜.

6. 馬場大海, 鬼塚昌彦, 中尾稔, 深堀麻衣, 佐藤達彦, 櫻井良憲, 田中浩基, 遠藤暁, PHITSを用いた京大学硼素中性子捕捉療法の線質評価炉, Jpn. J. Med. Phys. 29 suppl. 3, 86-87, 2009.9. 17-19、京都.
7. R. Randeep, K. Agrawal, 柴藤淳子、今中哲二、福谷 哲、田母神 繁、遠藤 暁, Sahoo Sarata Kumar, 増尾好則、木村真三、第52回日本放射線影響学会講演要旨集、pp. 66、2009.11.11-13、広島
8. H. Baba, Y. Onizuka, M. Nakao, M. Fukabori, T. Satoh, Y. Sakurai, H. Tanaka, S. Endo, Microdosimetric evaluation of neutron field for BNCT at Kyoto university reactor by using the PHITS code, MICROS 2009 - 15th International Symposium on Microdosimetry, 25-30 October 2009, Verona, Italy.

[その他]

平成 21 年度放射線医学総合研究所研究成果報告書

平成 22 年度放射線医学総合研究所研究成果報告書

平成 23 年度放射線医学総合研究所研究成果報告書

6. 研究組織

(1) 研究代表者

遠藤 暁 (ENDO SATORU)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：90243609

(2) 研究分担者

静間 清 (SHIZUMA KIYOSHI)
広島大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：10127657

(3) 連携研究者

高田 真志 (TAKADA MASASHI)
放射線医学総合研究所・主任研究員
研究者番号：50291109