

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

PET/MRI 相容成像探針技術研究
Investigation on the Technology of PET/MRI Compatible Imaging
Probe

計畫編號：1032001INER003

受委託機關(構)：國立清華大學

計畫主持人：王福年

聯絡電話：03-5715131 分機 35492

E-mail address：fnwang@mx.nthu.edu.tw

核研所聯絡人員：梁鑫京

報告日期：103 年 11 月 27 日

目 錄

目 錄	I
中文摘要	1
Abstract	2
壹、計畫緣起與目的	3
貳、研究方法與過程	8
一、實驗儀器設置與簡介	8
二、薄型化偵檢器之 RF 干擾測試	11
(一). 安裝薄型化之 PET 偵檢器於 RF 線圈與梯度線圈之間 ...	11
(二). 評估不同安裝位置與方向下，MRI 射頻干擾之差異	11
三、PET 偵檢器之屏蔽設計與其效能評估	12
(一). 協助設計偵檢器之 RF 屏蔽與抑制雜訊之效果	12
(二). 評估屏蔽影響下偵檢器偵測效率	12
(三). 評估屏蔽渦電流對於 MRI 磁場均勻度與成像之影響	13
四、發展後處理方法減低 RF 對於 PET 偵檢器之干擾	14
(一). 評估以能譜方式濾除雜訊之方法	14
(二). 評估以 RF 干擾之事件空間位置濾除雜訊之方法	15
五、其他	15
(一). 不斷電系統之電磁干擾	15
(二). 背景雜訊量測	16
參、主要發現與結論	17
肆、參考文獻	19

中文摘要

多模式分子影像(Multi-modal molecular imaging)是近年來高階醫療影像儀器發展的重要方向，其中尤以 PET/MRI 雙模式掃描儀的發展受到臨床與生物科學界的注意。此儀器最重要之零組件是可在 MRI 強磁場(1.5~7 Tesla)下正常運作的 PET 成像偵檢器，本委託研究計畫使用特製薄型 PET 偵檢器安裝於...完整內容請洽核研所聯絡人，以評估金屬屏蔽...完整內容請洽核研所聯絡人。本研究結果發現，將 PET 偵檢器安裝...完整內容請洽核研所聯絡人。此外，我們亦證實透過後處理...完整內容請洽核研所聯絡人。總結而言，未來仍需要琢磨進一步的金屬屏蔽設計以減緩 MRI 對 PET 偵檢器所帶來的影響，並嘗試客製化射頻探頭以配合 PET 偵檢器設置，將兩者相互干擾減至最低並最佳化其性能。

關鍵字：PET/MRI、PET 偵檢器、強磁場、射頻干擾

Abstract

Multi-modal molecular imaging has received great attention in the development of high-end medical instrument recently, especially the combination of PET and MRI as a hybrid modality for its extensive clinical and biological applications. The most challenging issue in PET/MRI is the performance of PET detector under strong magnetic field (1.5~7 Tesla). In this project a customized thin PET detector was installed ...please contact INER for the detail. Results show that the RF pulse interference ...please contact INER for the detail. In conclusion, advanced shielding design is essential to minimize RF interference, and a PET detector-compatible RF probe with optimized layout for PET detector is needed.

Keywords: PET/MRI, PET detector, strong magnetic field, RF interference

壹、計畫緣起與目的

近年來整合型的多模式分子影像 (Multi-modal molecular imaging) 備受國外許多研究團隊矚目，尤其以整合正子斷層掃描與磁振造影的 PET/MRI 造影系統更是各大儀器廠商全力開發的目標¹⁻⁸。PET 與 MRI 在醫學影像的領域中各有所長，於臨床上已是輔助診斷的主要儀器。其中 PET 具有高敏感度、準確性與量化分析之優勢，但其空間解析度不高則是其缺點。相對的，MRI 則有相當好的解析度而能得到良好的結構影像，且在軟組織對比、化學頻譜及動態血流等方面亦能提供有力的資訊，但在敏感度提升與量化分析層面則有許多進步的幅度。

臨床使用上，有些整合的例子則分別進行 PET 與 MRI 的掃瞄，再將兩者影像結果整合於同一空間上，便同時具有 MRI 的結構性影像與 PET 的功能性資訊^{9,10}。然而這種方法最大的問題在於影像對位 (Image registration)¹¹，若空間資訊上稍有誤差，疊合之影像便無法提供有效的相對資訊。藉由設計特殊的床、固定用具與軌道設定，能夠將掃描間的位置誤差縮至最小，但 PET 與 MRI 之造影室必須相近，勢必增加屏蔽的設計¹²。因此，若能將 PET 偵檢器與 MRI 整合在一起，能夠同時進行正子斷層掃描與磁振造影檢查的 PET/MRI 系統除了能於影像功能上互補外，兩者影像之對位的

問題亦能被簡化，只要固定 PET 偵檢器與 MRI 梯度線圈之相對空間位置，便毋須在每次掃瞄後進行影像對位的計算，具有相當大的臨床應用發展空間¹¹。

整合此二系統目前最大的難題在於 PET 偵檢器的製作與屏蔽設計。由於 MRI 強磁場的干擾，傳統的光電倍增管(Photomultiplier tubes, PMTs)訊號會受到非常大的干擾，因而無法正常使用。文獻上曾有研究使用光纖纜線將訊號傳送至磁場外圍再連接至光電倍增管放大^{13,14}，然而此舉會降低 PET 系統的靈敏度與效能，且光纖纜線相當佔空間而限制了系統的觀測範圍(Field of View, FOV)，因此並不實用。近年來較為廣為所用的設計則採用對於磁場干擾不敏感的半導體偵檢器，例如累崩光電二極體(Avalanche photodiode, APD)^{3,5}或較新穎的矽基半導體光電倍增器(Silicon photomultipliers, SiPM)^{7,8}，由於體積較小，能夠騰出更多空間而有較大的 FOV。參考 Judenhofer *et al.* 所整理之回顧¹¹，表一列舉出目前全球主要的 PET/MRI 原型機之磁場強度與所使用的系統：

表一 當前各研究團隊的 PET/MRI 系統

System	MRI Field Strength	Remarks
Raylman et al	3 T	2-detector system/PMT
Tatsumi et al	0.3 T	PS-PMT
Yamamoto et al	0.15 T	SiPM
Tübingen PET/MR	7 T	APD
RatCAP/MR	9.4 T	APD
UC Davis PET/MR	7 T	PS-APD
Cambridge PET/MR	1 T	PS-PMT
Tübingen PET/MR Generation II	7 T	APD—under development
UCD PET/MR Generation II	7 T	PS-APD—under development
Yoon et al	3 T	SiPM

目前常用的方法皆是設計客製化的 PET 偵檢器來符合現有之 MRI 系統，原因在於 MRI 系統的主磁體乃必備條件而無法任意更動，梯度線圈亦礙於空間的資訊設定而不方便位移與重新規劃，因此設計強磁相容之偵檢器與客製化的射頻線圈探頭為主要的途徑。因此，當前研發 PET/MRI 主要難題在於強磁相容之電子電路與屏蔽的設計，許多團隊正致力於開發更好的屏蔽設計與偵檢器型式，以及製作客製化的 RF 探頭之可能性¹⁵。目前醫療儀器大廠 Siemens 已有商品化的 PET/MRI 成像系統¹⁶，所採用的偵檢器為 APD，有相當數量的研究成果。

為了減緩 MRI 強磁場對於偵檢器電子電路的影響，通常使用金屬屏蔽來減少梯度磁場之變化所造成的不穩定性，以及射頻脈衝的訊號干擾。然而任何金屬物質於 MRI 的磁場中皆會造成一定程度的磁場不均勻，且在成像過程中，梯度線圈隨時間的開啟與關閉所產生的磁場變化會在金屬物質中引導出渦電流 (Eddy Current)，產生不必要的磁場波動而造成影像扭曲，並有可能將訊號耦合至偵檢器電路上而造成能譜訊號失真。再者，屏蔽對於訊號傳遞的衰減亦有一定的影響，降低了輻射訊號的偵測靈敏度。

由先前的委託研究計劃結果指出，使用 SiPM 技術的 PET 偵檢器對於 MRI 成像效能的影響主要為磁場不均勻，對於 MRI 成像的信雜比並沒有顯著的影響。我們發現主要的影響為 MRI 運作時

對於 PET 偵檢器所造成的干擾，影響層面包含強磁場的干擾與射頻脈衝的訊號耦合其中，RF 脈衝耦合至 PET 偵檢器輻射訊號的情形必須加以克服：我們認為將偵檢器設置於 RF 線圈外，並配合金屬屏蔽設計，能夠避免掉 RF 脈衝的干擾情形。然而任何金屬物質若置於 MRI 環境中，必定會對磁場均勻程度與 MRI 的影像品質造成干擾，因此必須針對屏蔽的形態設計與擺放位置進行特殊設計，並對金屬屏蔽所造成的影響最小化且審慎考量。

以下分別針對金屬屏蔽造成的磁場不均與渦電流效應進行簡單討論與介紹：

金屬屏蔽與磁場不均勻

金屬在與空氣接觸面附近所造成的磁化率影響會降低局部磁場均勻度，並會干擾射頻線圈接收訊號的效能，導致訊雜比下降。磁場均勻度於 MRI 系統中是一項極為重要的因素，若磁場不夠均勻，除了造成影像扭曲與失真外，訊號的 $T2^*$ 衰減亦相當快速而不利於成像，且對於磁場擾動敏感的脈衝程序便失去準確性。

金屬屏蔽與渦電流

根據 Faraday induction，在梯度線圈進行切換時所造成的磁場

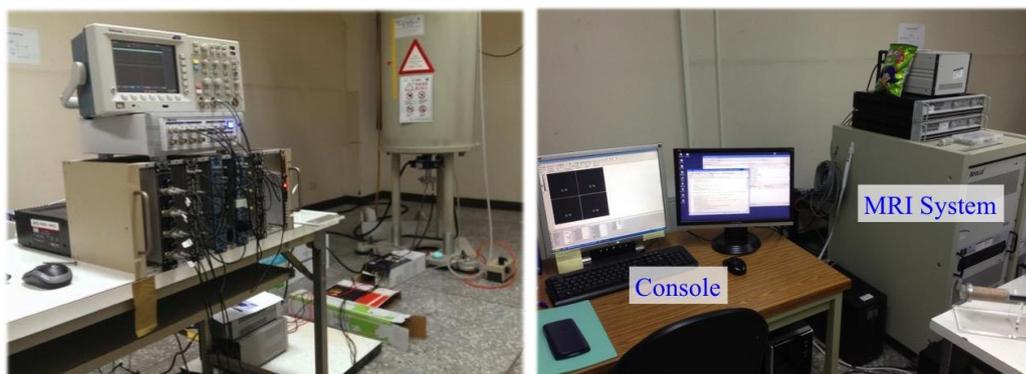
變化會引導出渦電流，短暫存在於屏蔽物質中。渦電流所造成的影響主要有以下二點：(1)局部磁場不均勻與假影，(2)梯度線圈切換速度。渦電流會產生局部的磁場擾動，如上述磁場不均勻所帶來的影響，使影像品質低落並產生頻率飄移(frequency shift)。此外，若此屏蔽上之渦電流耦合至梯度線圈上，由於渦電流殘留於梯度線圈中，使梯度線圈在開啟與關閉時無法在較短時間內達到要求的梯度強度，因而影響 MRI 空間編碼的速度與 MRI 整體性能。

綜合以上，本委託計畫將測試符合本實驗室的空間之薄型化 PET 偵檢器，分析其效能並發展適合的屏蔽設計以減低來自 MRI 的干擾，同時評估金屬屏蔽對於 MRI 成像性能的影響。

貳、研究方法與過程

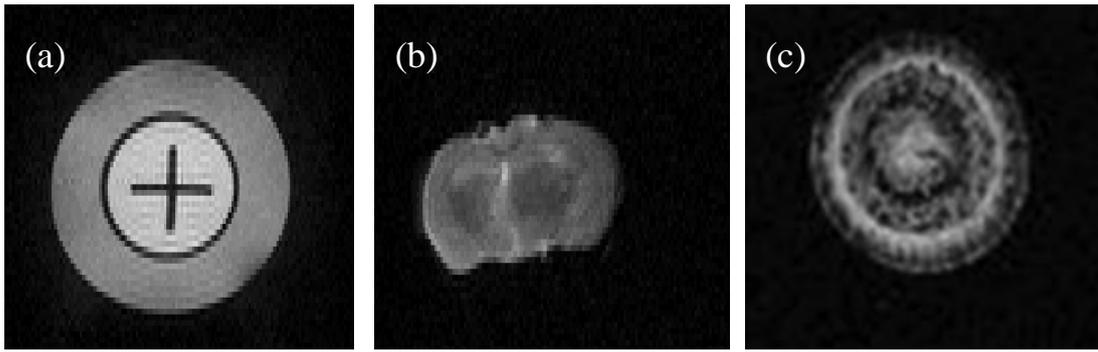
一、實驗儀器設置與簡介

我們使用本實驗室於清大醫環系自立建構的 4.7T 磁振影像系統作為實驗平台，如圖一所示，備有 30mm 內徑體射頻線圈（Bruker BioSpin GmbH, Ettlingen, Germany）、高性能梯度線圈（Resonance Research Inc., MA, USA）與 Apollo 主機控制系統（TECMAG Inc., TX, USA）。



圖一、位於清大醫環系的 4.7T 磁振影像系統儀器配置。

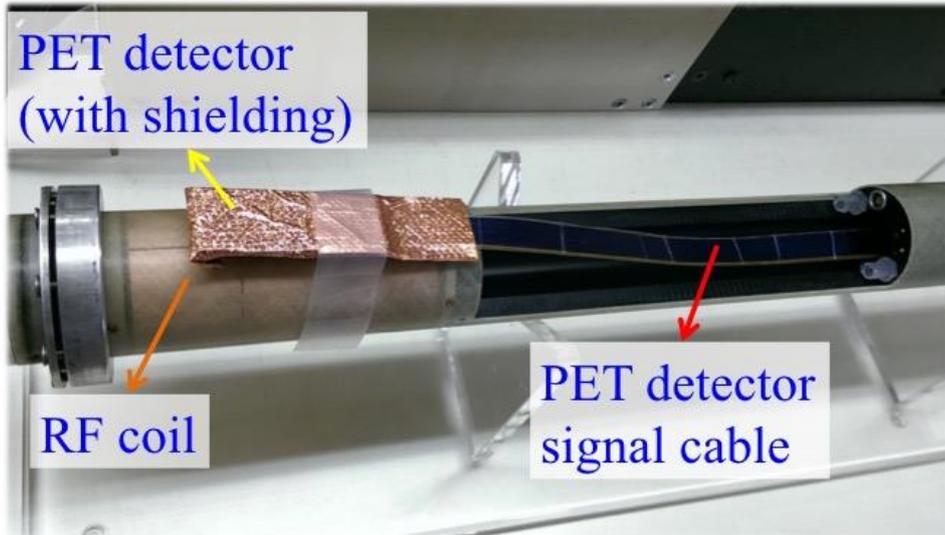
於電腦主機部分，使用 TECMAG 的 NTNMR 軟體控制 Apollo 主機進行 MRI 的訊號與影像擷取，同時主機上具有 Matlab 軟體能夠針對掃描得到的影像進行即時處理與分析。圖二為使用本系統所掃描而得的影像範例：



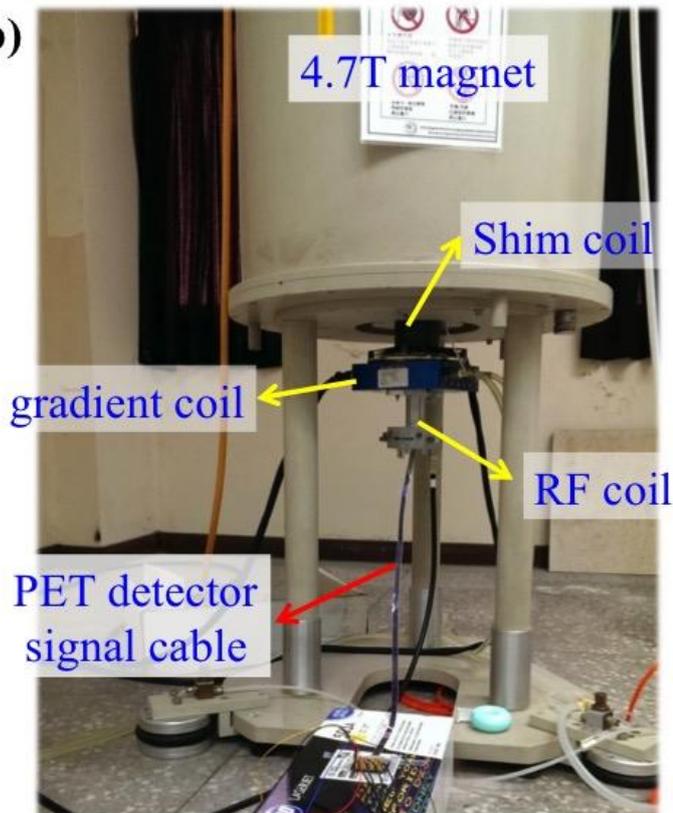
圖二、(a)圖為水溶液仿體之 T1 權重影像，(b)圖為小鼠大腦之 ex vivo 影像，(c)圖為榕樹植物莖之橫切面影像。最高解析度可達 $78\mu\text{m}$ 。

儀器架設部分如圖三所示。圖三(a)為射頻線圈 (radio frequency, RF coil) 與 PET 偵檢器，黃色箭頭標註處為線圈本體，藍色箭頭標註為薄型 PET 偵檢器。我們將 PET 偵檢器安裝於射頻線圈與梯度線圈之間的間隙，其相對位置圖可以參考圖五(b)。圖三(b)則為 4.7T 永久磁鐵本體與磁場均勻線圈 (Shim coil)、梯度線圈與射頻線圈的相對應位置，PET 偵檢器的訊號線可沿著射頻線圈中心的預留通道連接至線圈外的電路，接著再接至核儀模組 (Nuclear Instrumentation Module, NIM) 與數據擷取系統擷取訊號。

(a)

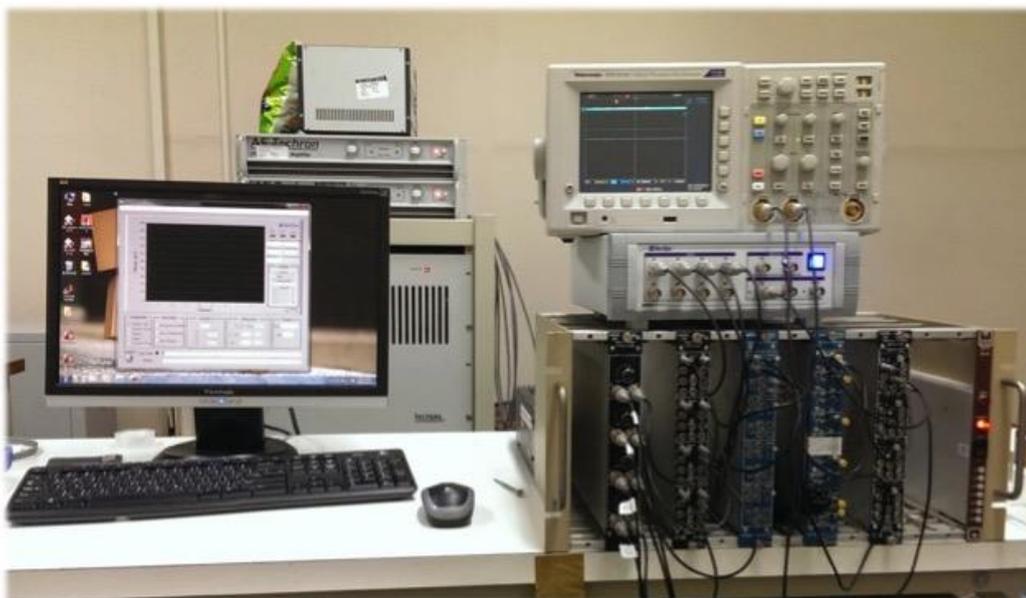


(b)



圖三、

(a) 射頻線圈與PET偵檢器配置。
(b) 線圈與超導磁鐵的相對應位置相對應位置。其中，PET偵檢器的訊號線可由射頻線圈內連接至磁鐵外的電路(OP放大器)。



圖四、輻射訊號擷取裝置，包含核儀模組、數據擷取系統與電腦，示波器可用來即時監測輻射訊號。

二、薄型化偵檢器之 RF 干擾測試

- (一). 安裝薄型化之 PET 偵檢器於 RF 線圈與梯度線圈之間
先前的委託研究計劃乃是將 PET 偵檢器置於 RF 線圈中心...完整內容請洽核研所聯絡人。

- (二). 評估不同安裝位置與方向下，MRI 射頻干擾之差異
於此，我們測試兩種方向的擺放...完整內容請洽核研所聯

絡人。

三、PET 偵檢器之屏蔽設計與其效能評估

(一). 協助設計偵檢器之 RF 屏蔽與抑制雜訊之效果

我們以 XX 厚度的銅箔針對 PET 偵檢器本體進行包覆，同時也針對...完整內容請洽核研所聯絡人。

於 RF 脈衝部分，我們發現 RF 脈衝會使...完整內容請洽核研所聯絡人。

我們接著增加屏蔽包覆，發現...完整內容請洽核研所聯絡人。

(二). 評估屏蔽影響下偵檢器偵測效率

以示波器與二維晶體響應圖觀察，屏蔽並不會影響其訊號，亦或是增加任何雜訊。MRI 掃描過程中，屏蔽亦沒有明顯影響偵檢器對於自發性輻射的偵測效率。

進一步考量銅箔對於加馬射線的衰減，可以針對 0.511MeV 能量，利用衰減公式：

$$I_x = I_0 \exp(-\mu x)$$

其中 I 為輻射強度(radiation intensity)，x 為衰減距離(厚度)。

查表得知，銅在 0.511MeV 的能量下，其線性衰減係數(μ)為

0.73 cm^{-1} 。以 0.1mm 單層銅箔屏蔽而言，0.511MeV 的光子通過屏蔽後的強度為原本的 99.27%，屏蔽所造成的影響幅度相當小。若提高至 6 層屏蔽厚度，即 0.6mm 之銅箔厚度，推算所得之訊號強度應為原本的 95.71%，衰減幅度亦不大。因此，銅箔屏蔽對於偵檢器計數率的影響應屬輕微。

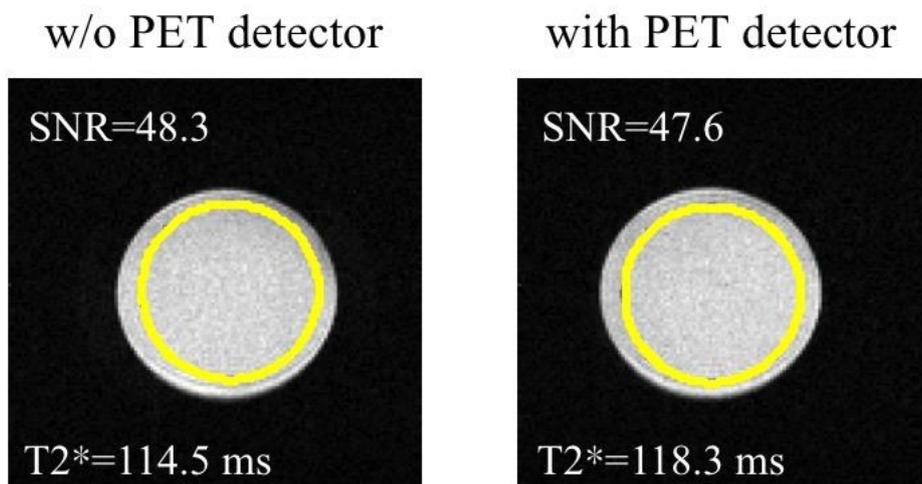
(三). 評估屏蔽渦電流對於 MRI 磁場均勻度與成像之影響

如圖十五所示，分別為在無 PET 偵檢器/有 PET 偵檢器(加上單層 XX 厚之屏蔽)之配置下所取得的梯度回訊(Gradient echo)影像。首先我們評估影像的信雜比(Signal to noise ratio, SNR)，以 TE=5 的影像進行評估，發現安裝 PET 偵檢器對於 SNR 的影響幅度相當小，影像整體品質也沒有受到明顯影響。

接著，我們改變不同的 echo time (TE)藉此量測水假體的 T2*值。T2*值對於磁場的均勻程度相當敏感，若磁場不均勻，則 T2*值會下降。經由經由 fitting 計算結果發現，T2*值並沒有因為 PET 偵檢器的安裝而有所下降。這樣的結果表示磁場均勻度並沒有受到 PET 偵檢器以及金屬屏蔽的影響，即使在有大片金屬物質存在的狀況下，其引發的 Eddy current 並沒有明顯影響 MRI 影像品質。

(掃描參數：Field of view, FOV=25x25mm, slice

thickness=1mm, matrix size=128x128, TR=2000ms, TE=5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180 and 200 ms.)



圖十五、MRI 影像的信雜比與磁場均勻度分析。可以發現安裝 PET 偵檢器後對於影像品質與 T2* 值並沒有明顯的影響。

四、發展後處理方法減低 RF 對於 PET 偵檢器之干擾

(一). 評估以 XX 方式濾除雜訊之方法

先前研究發現偽計數分佈在...完整內容請洽核研所聯絡人。

後處理結果顯示，我們能夠...完整內容請洽核研所聯絡人。

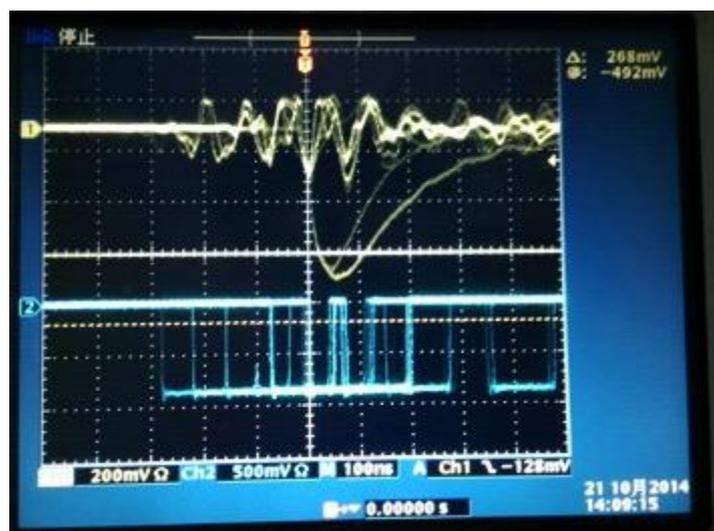
(二). 評估以 RF 干擾之事件空間位置濾除雜訊之方法

由於在薄型 PET 偵檢器上，我們發現 RF 干擾會...完整內容請洽核研所聯絡人。

五、其他

(一). 不斷電系統之電磁干擾

經過評估，我們發現金屬屏蔽仍不能將 MRI 主機的 220V 不斷電系統所產生的電磁波干擾給予去除，如圖十七所示。



圖十七、受不斷電系統所干擾的輻射訊號。藍色線條的 Trigger 訊號受到嚴重的影響。

(二). 背景雜訊量測

我們於測量背景雜訊的過程中發現...完整內容請洽核研所聯絡人。

我們推測有二種可能原因：

(1) ...完整內容請洽核研所聯絡人。

(2) ...完整內容請洽核研所聯絡人。

參、主要發現與結論

本研究中將特製薄型 PET 偵檢器置於射頻線圈與梯度線圈之間，主要測試可以分為三個部分：一、RF 脈衝與梯度磁場變化對於此配置模式所造成的影響。二、評估於 PET 偵檢器上設置金屬屏蔽的效能與所引起的影響。三、測試後處理方法去除 RF 雜訊干擾的問題。

首先，將 PET 偵檢器安裝於...完整內容請洽核研所聯絡人。

關於金屬屏蔽部分，在 PET 偵檢器安裝於...完整內容請洽核研所聯絡人。我們仍認為需要測試不同的金屬屏蔽材質與形態，來深入探討屏蔽的問題。

於 MRI 影像與其掃描性能方面，實驗顯示 PET 偵檢器對 MRI 影像的訊雜比沒有受到干擾，且磁場均勻度亦沒有受到顯著影響。此結果證明，將 PET 偵檢器安裝於...完整內容請洽核研所聯絡人，較有利 MRI 的訊號擷取，亦也是國外研究的主流設計方式。

我們亦測試使用影像後處理方式，濾除...完整內容請洽核研所聯絡人，因此需要審慎進行。

我們亦額外發現，PET 偵檢器的...完整內容請洽核研所聯絡人。

總結以上，將偵檢器設置於...完整內容請洽核研所聯絡人，未來需要深入研究並設計更完善的屏蔽系統以去除 RF 脈衝干擾。此外，亦可能設計客製化之線圈，將偵檢器與 RF 探頭結合為一整合性探頭，將兩者彼此的相互干擾減至最低並最佳化其運作性能。

肆、参考文献

- 1 Raylman, R. R. *et al.* Simultaneous MRI and PET imaging of a rat brain. *Phys Med Biol* **51**, 6371-6379, doi:Doi 10.1088/0031-9155/51/24/006 (2006).
- 2 Judenhofer, M. S. *et al.* PET/MR images acquired with a compact MR-compatible PET detector in a 7-T magnet. *Radiology* **244**, 807-814, doi:Doi 10.1148/Radiol.2443061756 (2007).
- 3 Judenhofer, M. S. *et al.* Simultaneous PET-MRI: a new approach for functional and morphological imaging. *Nat Med* **14**, 459-465, doi:Doi 10.1038/Nm1700 (2008).
- 4 Pichler, B. J., Judenhofer, M. S. & Wehrl, H. F. PET/MRI hybrid imaging: devices and initial results. *Eur Radiol* **18**, 1077-1086, doi:10.1007/s00330-008-0857-5 (2008).
- 5 Maramraju, S. H. *et al.* Small animal simultaneous PET/MRI: initial experiences in a 9.4 T microMRI. *Phys Med Biol* **56**, 2459-2480, doi:Doi 10.1088/0031-9155/56/8/009 (2011).
- 6 Tatsumi, M. *et al.* Simultaneous PET/MR body imaging in rats: initial experiences with an integrated PET/MRI scanner. *Ann Nucl Med* **26**, 444-449, doi:Doi 10.1007/S12149-012-0581-8 (2012).
- 7 Yamamoto, S. *et al.* Simultaneous imaging using Si-PM-based PET and MRI for development of an integrated PET/MRI system. *Phys Med Biol* **57**, N1-N13, doi:Doi 10.1088/0031-9155/57/2/N1 (2012).
- 8 Yoon, H. S. *et al.* Initial Results of Simultaneous PET/MRI Experiments with an MRI-Compatible Silicon Photomultiplier PET Scanner. *J Nucl Med* **53**, 608-614, doi:Doi 10.2967/Jnumed.111.097501 (2012).
- 9 Cho, Z. H. *et al.* A fusion PET-MRI system with a high-resolution research tomograph-PET and ultra-high field 7.0 T-MRI for the molecular-genetic imaging of the brain. *Proteomics* **8**, 1302-1323, doi:Doi 10.1002/Pmic.200700744 (2008).

- 10 Zaidi, H. *et al.* Design and performance evaluation of a whole-body Ingenuity TF PET-MRI system. *Phys Med Biol* **56**, 3091-3106, doi:Doi 10.1088/0031-9155/56/10/013 (2011).
- 11 Judenhofer, M. S. & Cherry, S. R. Applications for Preclinical PET/MRI. *Semin Nucl Med* **43**, 19-29, doi:Doi 10.1053/J.Semnuclmed.2012.08.004 (2013).
- 12 http://www3.gehealthcare.com/en/Products/Categories/Molecular_Imaging/PET_CT_and_MR_Trimodality_Imaging
- 13 Shao, Y. P. *et al.* Simultaneous PET and MR imaging. *Phys Med Biol* **42**, 1965-1970, doi:Doi 10.1088/0031-9155/42/10/010 (1997).
- 14 Slates, R. B. *et al.* A study of artefacts in simultaneous PET and MR imaging using a prototype MR compatible PET scanner. *Phys Med Biol* **44**, 2015-2027, doi:Doi 10.1088/0031-9155/44/8/312 (1999).
- 15 Zaidi, H. & Del Guerra, A. An outlook on future design of hybrid PET/MRI systems. *Med Phys* **38**, 5667-5689, doi:10.1118/1.3633909 (2011).
- 16 <http://healthcare.siemens.com/molecular-imaging/pet-mr/biograph-mmr>