

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

MRI 系統對 PET 成像偵檢器之干擾與影響研究
On the interference and influence of PET detector by MRI system

計畫編號：1022001INER047

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：102 年 11 月 29 日

目錄

目錄	0
中文摘要	1
英文摘要	2
壹、計畫緣起與目的	3
貳、研究方法與過程	7
一、實驗儀器設置與簡介	7
二、PET 成像偵檢器對 MRI 之影響與研究	10
(一) MRI 磁場均勻度	10
(二) MRI 訊號品質	11
三、MRI 環境對 PET 成像偵檢器影響	11
(一) 強磁場的影響	11
(二) 梯度磁場所造成的影響	11
(三) 射頻脈衝的影響	11
(四) 其他	12
參、主要發現與結論	13
肆、參考文獻	14

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，本研究委託計畫評估強磁場對 PET 偵檢器的影響及 PET 偵檢器對 MRI 系統之干擾。本研究在 4.7 Tesla 的磁場下進行實驗的結果顯示，PET 偵檢器對於 MR 系統主要的影響是造成磁場均勻度下降（對影像訊雜比影響較小）；而 PET 偵檢器則主要會受到 MRI 強磁場與激發射頻脈衝的干擾，其中射頻脈衝的訊號更會耦合至偵檢器電子訊號當中，但是梯度磁場開關影響則不大。我們認為可能的解決方案有二：

1. 將 PET 偵檢器設置於射頻線圈外，並配合金屬屏蔽設計
2. 設計客製化探頭配合偵檢器之配置，最佳化兩者的性能。

關鍵字：PET/MRI、PET 偵檢器、強磁場、射頻干擾

英文摘要

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 we examined the compatibility in a 4.7 Tesla MR system. The results of this project showed that the interference from PET detector to a MR system was mainly on the field inhomogeneity, while the SNR of MR signal was unaltered. The performance of PET detector was reduced in the present of strong magnetic field and RF pulses. The on-and-off of gradient field did not show significant interference on the PET detector. RF pulse would be couple into the detector electric circuit and induced artifact signals. Therefore, we suggest two possible solutions: 1. Set up PET detector outside the RF coil, and design proper shielding devices. 2. Design a PET detector-compatible RF probe with customized layout for detector, thus the performance of both MRI and PET detector could be optimized.

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共振造影的 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 的掃描，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。藉由設計特殊的移動平台、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，勢必須增加屏蔽的設計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共振造影檢查的

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.* 在 2013 年發表之文獻回顧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…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)

為了減緩 MRI…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)。以下將針對上述幾點做簡介：

MRI 與 PET 偵檢器之相互影響

如上述所提之強磁干擾對於電子設備所造成的影響，…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)

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，…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)

金屬屏蔽與渦電流

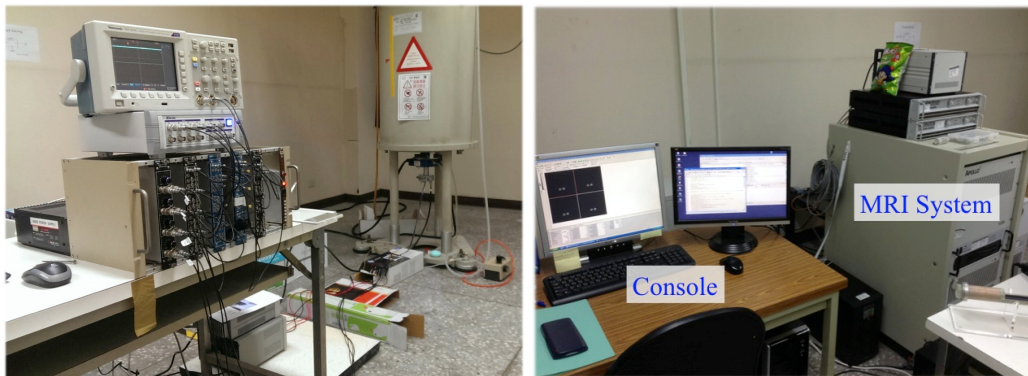
根據 Faraday induction，在梯度線圈進行切換時所造成的磁場變化會引導出渦電流，…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)

綜合以上，當前研發 PET/MRI 主要難題在於…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)。因此，本研究測試核研所…自製之新式 PET 偵檢器於 MRI 強磁場下的運作情形，並針對 MRI 與 PET 偵檢器之間的相互影響進行評估。

貳、研究方法與過程

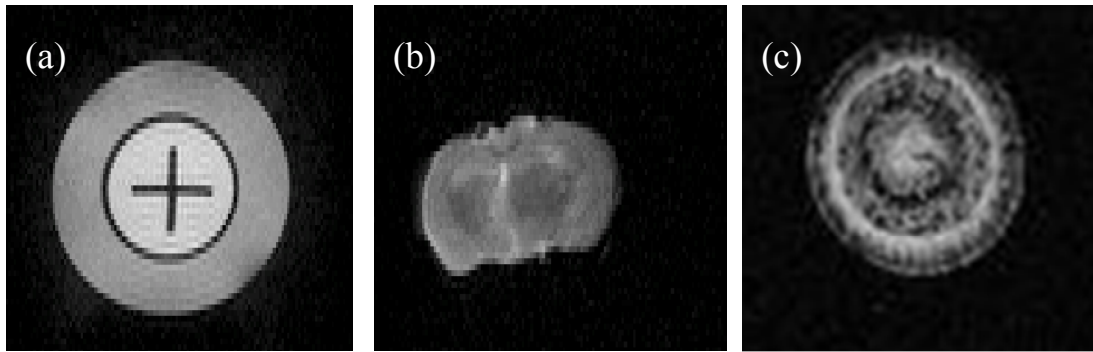
一、實驗儀器設置與簡介

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）。



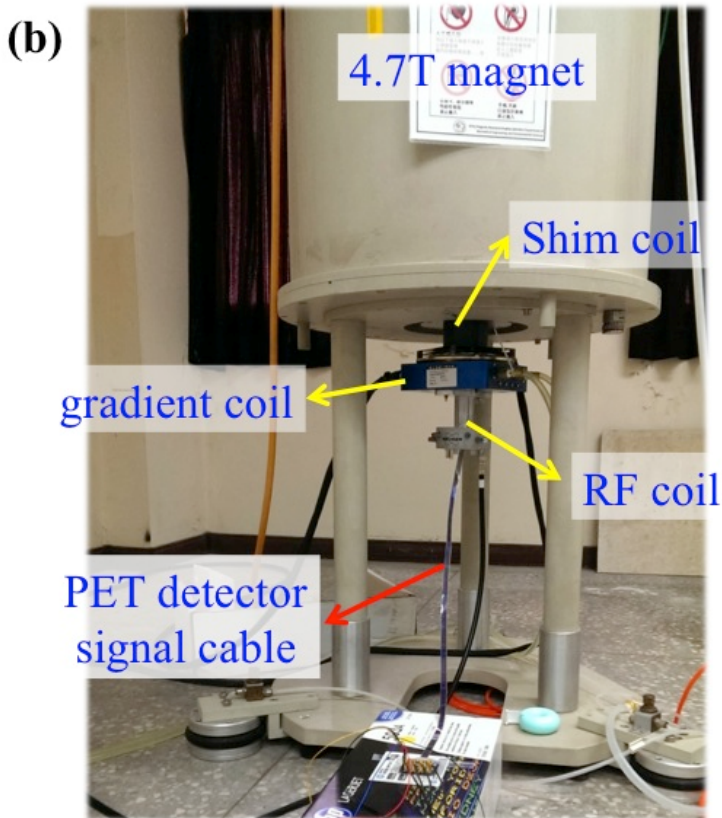
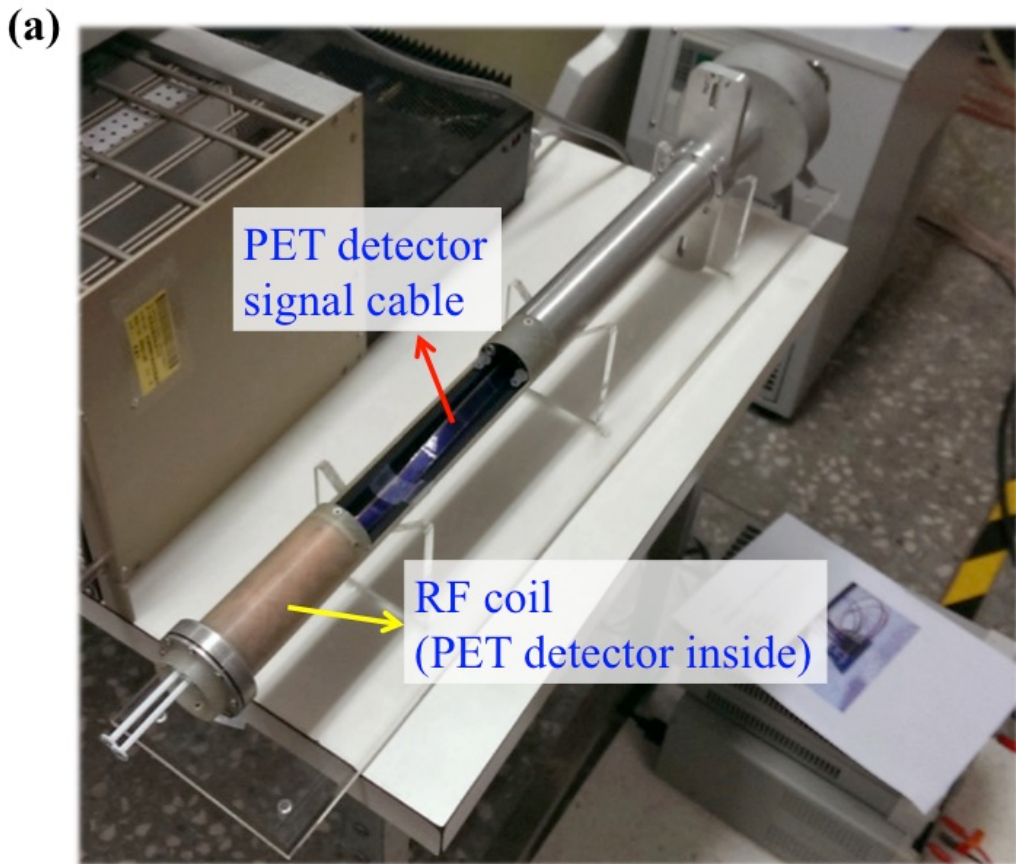
圖一、位於清大醫環系的4.7T磁振影像系統儀器配置。

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 $78\mu\text{m}$ 。

圖三(a)所示為射頻線圈 (radio frequency, RF coil)，黃色箭頭指向處為線圈本體，由於射頻線圈與梯度線圈之間間隙只有 7mm，無法將 PET 偵檢器置於其間，因此於本研究中我們將 PET 偵檢器置於線圈本體內部來進行評估，其相對位置圖可以參考圖六(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…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)



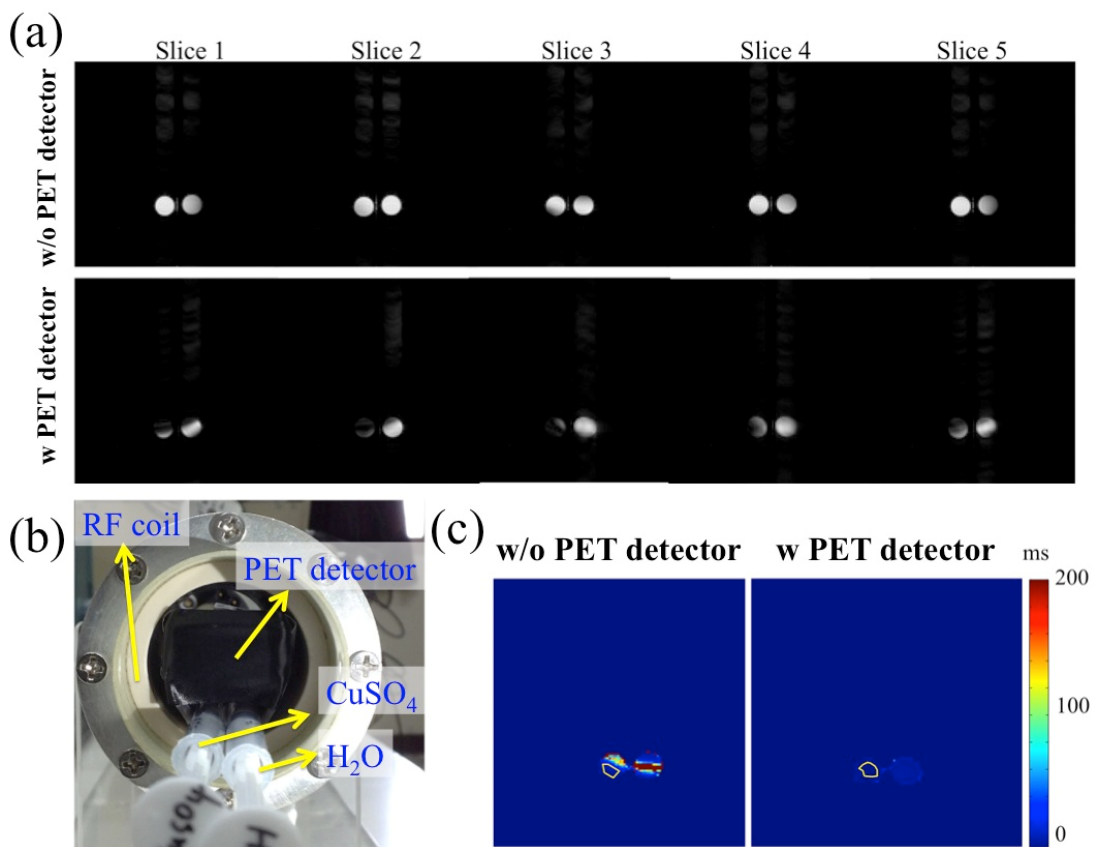
圖三、

(a)射頻線圈（PET偵檢器置於線圈本體內部中心）。
(b)線圈與超導磁鐵之間的相對應位置。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。

二、PET 成像偵檢器對 MRI 之影響與研究

(一) MRI 磁場均勻度

此一部份我們以梯度回訊(Gradient echo)方法造影，此種影像主要為 T2*對比，能夠感應空間中的磁場不均勻程度。圖六(b)為 PET 偵檢器、RF 線圈與假體樣本的空間配置情形。圖六(a)所示為多切面的梯度回訊影像 (TE/TR=10/5000ms, FOV=50×50 mm², Matrix size=128×128) …全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)



圖六、放入 PET 偵檢器與否所取得之(a)不同切面的梯度回訊影像，(c)T2* map 比較。其中(b)圖則為 PET 偵檢器、RF 線圈與假體的配置情形。

(二) MRI 訊號品質

我們掃描一般的自旋回訊 (Spin echo) T2 權重影像 (TE/TR=40/8000ms, FOV=50×50 mm², Matrix size=128×128)，藉以…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)

三、MRI 環境對 PET 成像偵檢器影響

(一) 強磁場的影響

首先，我們於放入強磁場前後觀察示波器上的…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)

(二) 梯度磁場所造成的影響

於二維晶體響應圖中，使梯度線圈以掃描影像方式運作時…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)

(三) 射頻脈衝的影響

由於我們將 PET 偵檢器置於射頻線圈中間，因此原本即預期…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)

值得注意的是，在 MRI 中成像射頻脈衝的訊號頻率應為

200MHz 左右…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)

(四) 其他

除了主磁場、梯度磁場與 RF 脈衝外，我們亦發現…全文請洽
核能研究所(mljan@iner.gov.tw)

參、主要發現與結論

本研究中將 PET 偵檢器置於 MRI 強磁場中進行…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)

總結以上，PET 偵檢器對於 MR 影像的干擾主要為…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)；我們認為將…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)，因此在這方面需要深入研究並設計，這亦是當前國際研發團隊主要著重的問題。此外，亦可能設計客製化…全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)。

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 …全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)
- 16 …全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)
- 17 …全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)
- 18 …全文請洽核能研究所(mljan@iner.gov.tw)