

回旋加速器与医用同位素的生产

(调 查 报 告)

上海原子核研究所图书情报资料室

情 报 组

一 九 七 六 年 三 月

一、回旋加速器及医用同位素的生产概况

1. 引言

回旋加速器是1930年发明的研究核物理的一种重要设备。它对核物理的研究和整个原子能事业的发展起过重大作用。

从30年代开始,即在回旋加速器建立的最初年代,回旋加速器在生物医学方面的应用也逐渐开展起来,医学方面的应用主要沿着二个方向发展。一方面是快中子治癌。回旋加速器是直到目前为止能够提供足够强度的快中子通量,以满足快中子治癌要求的唯一设备。另一个重要用途,是利用回旋加速器来生产医用同位素。由于它能提供反应堆不能供应的一些同位素,而且回旋加速器生产的一些同位素具有寿命短,能量单一等特点,因此特别适合于临床诊断和治疗,近年来利用回旋加速器产生的各种带电粒子束,作为活化分析和荧光分析手段,以测定生物机体中所含的各种微量元素,以此来评定环境污染对生物的影响,研究人体中某些微量元素的异常所产生的后果等等也日益引起重视。因此,生物医学界对回旋加速器的注意日益增加,自60年代以来,世界各国的医学研究中心都相继建立回旋加速器实验室,成了当前回旋加速器的主要用户。

另一方面现在在各医学研究中心所建立的回旋加速器,也已不是50年代以前的那种回旋加速器。50年代以前的回旋加速器都是均匀磁场式能量恒定不可调。而目前已成为工业产品的回旋加速器都是磁场沿方位角变化,能量可调的回旋加速器。这类加速器的特点是结构上更轻巧,可以把粒子,特别是把质子加速到更高的能量,而且流强比过去更高,运行和维修都比较简单。这些特点都使回旋加速器更适用于医学研究方面。从60年代以来,这类回旋加速器已成为加速器发展中的一个重要分支,是多次国际回旋加速器会议讨论的主题之一〔1, 2, 3〕。许多国家已成立了专门建造这类回旋加速器的公司。表1列出了这些工业生产回旋加速器的技术指标。 — 2 —

表1 一些工业生产的回旋加速器的技术指标

型 号	能 量 (Mev)			外靶流强 (μa)			内靶流强 (μa)			磁极直径	重 量	尺 寸 (米)	国 家
	P, d,	He ³ , a	α	P, d,	He ³ , a	α	P, d,	He ³ , a	α				
CS-15	15 8	20	15	50	500	50, 50	200	200	200	30吋	13.6吨	2.8×2.2×2.2	美
CS-22	22 12	31	24	50	50	50	100	100	100	38吋	22.6吨	3.2×3.0×3.4	美
CS-30	26 15	39	30	60	100	70	500	500	150	38吋	2.2吨		美
AEG	20 10	27	20	100	100	25	1000	1000	50	105厘米	30吨	2.3×2.7×2.5	德
MC-20	20 10	27	20	50	—	100	200	200	200	90厘米	21吨		瑞典
菲利浦	18 9	24	18	100	100	100	100	100	100	85厘米	14吨	2.0×0.8×1.16 2.2×0.7×1.0 (磁极尺寸)	荷
汤普森	19 11	28	22	50	—	70				90厘米	14吨		法

人工放射性同位素来源主要有三个方面，即用反应堆进行生产，用回旋加速器进行生产和分离裂变产物。反应堆是生产放射性同位素的最主要工具，无论就品种和数量来说，它在三个来源中居于首位。裂变同位素是原子能工业的副产物，由裂变产物分离的同位素，目前仅有 Sr^{90} ， Cs^{137} ， Pm^{147} 等几种，品种较少。

用加速器生产同位素的历史可回溯到30年代中期，随着人工放射性同位素的发现和加速器的建立，从30年代中期到40年代中期，加速器是当时主要的同位素生产工具。因为当时反应堆还没有建立，而靠一些人工中子源来生产同位素要比加速器差得多。所以在推动早期同位素应用的研究工作中，加速器作出了自己的贡献。1946年以后，反应堆生产的同位素开始供应各方面的需要。由于反应堆可以供应的同位素品种更多，强度更大，而且生产成本更低，因而反应堆迅速代替加速器成为主要的同位素生产工具。在一段时期内，用加速器生产同位素曾受到一定程度的忽视。有一些使用同位素的人，误以为反应堆可以供应一切同位素。实际上并非如此，加速器生产的同位素很多是不易从反应堆中获得的，而且用加速器生产的同位素有自己的特点，是反应堆中生产的同位素所无法比拟的。在同位素应用的一个主要领域——医用同位素方面更是如此。医用同位素的发展方向是采用半衰期较短，射线能量单一的放射性同位素。加速器能够比反应堆更好地满足这些要求。因此，在很多国家的一些医疗中心都相继建立回旋加速器，用来制备医用放射性同位素。

2. 加速器生产放射性同位素的优越性

用加速器生产的放射性同位素与反应堆生产的相比，概括起来有如下一些优点：

1. 在反应堆中主要是利用反应堆中的热中子俘获，即利用 (n, γ) 反应生产同位素，所生成的同位素与靶核材料都是同一元素。在加速器

中是用被加速的各种带电粒子引起的核反应即利用 (p, n) (d, n) (α, n) 等反应来进行生产, 这时生成的同位素与靶核材料的元素不同, 故易于用化学方法进行分离, 可进行无载体生产。因而利用加速器生产可以获得纯度和放射性比度较高的同位素。

2. 由于加速器生产同位素时, 入射粒子是荷电粒子, 所生成的同位素都是缺中子同位素, 这类同位素在衰变时, 大多是电子俘获, 或发射正电子, 不发射其它带电粒子, 因此作为诊断用的医用同位素使用时, 病人所接受的剂量小。例如用回旋加速器生产的同位素 I^{123} , 其半衰期是 13.3 小时, 衰变时为电子俘获, 伴随着放出 159 KeV 的单能光子。用它代替反应堆中生产的 I^{131} 来作甲状腺诊断时, 病人所受的剂量仅为后者的 $1/100$ 。由于 I^{123} 的剂量小, 所以可以用于儿童或孕妇作甲状腺扫描之用。至于发射正电子的衰变方式, 在正电子湮灭时, 放射出能量恒定 (0.51 MeV) 的二个光子。这有助于诊断时的探测定位或照相。

3. 构成生物机体的主要元素是 C, N, O , 其 (n, γ) 的反应截面低, 因此在反应堆中不能有效的生产这类同位素, 或即使能生产, 但生成的同位素的核特性, 特别是半衰期过长或过短, 不适宜作临床诊断之用。而在医学上为了测定各有关器官的功能, 又很需要这类同位素。用加速器可以很方便的生产 C^{11} , N^{13} , O^{15} 等短寿命同位素。目前医学上所用的这类同位素基本上都是由加速器生产和提供的。还应该指出, 这三种同位素寿命都比较短。 C^{11} 的半衰期是 20 分钟, N^{13} 是 10 分, O^{15} 只有 123 秒。因此这三种同位素的用户必须和生产单位非常靠近, 并且能密切配合。而加速器比较容易做到这点。

4. 利用加速器生产同位素, 使短寿命同位素的应用有了可能, 建造一台生产同位素的加速器, 其投资和规模要比建造反应堆小得多, 运行和管理也要方便得多。因为反应堆不能象加速器那样较为普遍的建立。

这样就妨碍了应用短寿命同位素工作的开展。而在医学方面使用短寿命同位素的愿望又很迫切。因为这有很多优点，如病人和工作人员所受的剂量小，可以在一个较短的时间内对病人进行重要的测量和检查，放射性废物的处理问题或环境沾污问题大为简化，同时使用短寿命同位素在测量方面也可获得较高的精确度。由于这样一些原因，就使得很多有基础的医疗研究中心下决心建造加速器来作为生产同位素的工具，以满足本单位及邻近地区的需要。

从生产同位素的角度看，希望加速器有适当的能量，和较高的束流强度。一些低能加速器如静电加速器，高压倍加器，虽然可能提供较高的束流强度，但因为被加速粒子的能量太低，生产品种有限，不能成为生产同位素的有用工具。而同步回旋加速器等高能加速器，则又因流强太小，不能产生足够量的有用同位素，而且它们的造价和运行费用太高，也不是一般单位所能负担得了的。因此很自然地在生产同位素方面，人们就选择了回旋加速器。迄今为止回旋加速器是已在运行中的，或正在考虑建立自己的生产同位素工具的医疗中心的唯一选择对象。他们所考虑的是选择何种能量的回旋加速器，即回旋加速器的大小。因为能量高些，生产能力就大些，但所化的代价也就要高些。而对加速器的类型是意见一致的。这是因为回旋加速器在生产同位素方面有很多优点：能量适中，流强足够，可以加速多种粒子，因而可利用很多核反应来生产多种有足够强度的放射性同位素。

根据粗略统计目前在作为同位素的生产工具运行中的回旋加速器在20台以上，现将其中一些回旋加速器的情况介绍于表2中：

表2 生产用加速器一览表 (续)

国家	单 位	地 点	加速尺寸	加速形式	最大束流 (μA)	靶面尺寸 (cm ²)	P	d	a	b	最大内靶流强 (μA)	建成时间
1 英	医学研究委员会哈罗克斯医院	伦敦	45"	均匀	15,000	2 水平	8	15	32		500	1955
2 英	英国放疗中心	白金汉郡	140"	交叉(AVF)	15,000	1 水平	23	17	34	44	>500	1965
3 美	克利夫兰实验室	田纳西州	85"	均匀	8,800	2 垂直	23				2600	1950
4 美	华盛顿大学医学院	雷苏里尔	36"	均匀	14,000	1 水平	16	8			200	1967
5 英	阿宾郡癌症医院	芝加哥	CS-15型									1969
6 美	史隆-凯特琳肿瘤医院		CS-15型									1967
7 美	麻省理工学院医院	波士顿	Allis-Chalmers									1967
8 美	马萨诸塞特福射学研究所	波士顿	Allis-Chalmers									1965
9 美	加利福尼亚大学	洛杉矶	CS-22型									1971
10 美	蒙特西内医院	迈阿密	CS-50型									1972
11 西德	核医学研究所	海德堡	AFG(Compact)型									1972
12 西德	莱昂医院	汉诺威	Scanditronix(MC-20)型									1973
13 西德	汉堡医院	埃森	CS-30型									1974
14 法	弗雷德里克-约里奥实验室	奥尔良	Thompson-CSF(Compact)型									1971
15 比	列日大学	列日	Thompson-CSF(Compact)型									1974
16 荷	阿格加迪和同位素实验室	贝登	140cm ² 交叉(AVF)	15,300	1 水平	23	17	34	44	500	1967	
17 苏	列宁-力能研究所	莫斯科附近	150cm ² 均匀	17,000	2 水平	11	22	44		3000	1963	
18 日	东京大学医学研究所	东京	CS-30型									1973
19 日	千叶大学医学部放射学研究所	千叶	Thompson-CSF(Compact)型									1974

3. 一些国家用回旋加速器生产同位素的情况:

3.1 美国

美国是最早开始应用回旋加速器生产同位素的国家,从1935年起就开始应用由第一台回旋加速器所生产的 ^{128}I , ^{131}I , ^{59}Fe 等于生物,医学方面的研究⁽⁴⁾,这是最早期的工作。此后在美国的几个国家实验室,如ORNL, BNL等都逐渐利用自己的加速器来生产反应堆无法提供的一些同位素。ORNL于1950年建成一台86"的回旋加速器,建这台加速器的目的是用来生产居里级的 ^{208}Po ,在 ^{208}Po 的生产计划完成后,它主要用于核物理研究,也化一小部份时间来生产同位素。从1962年开始,它划归同位素部主管后,就专门用来生产同位素了⁽⁵⁾。主要利用17—22 MeV的质子束生产 ^{123}I , ^{67}Ga , ^{84}Rb 等同位素。从1955年起美国原子能委员会不再处理和分配回旋加速器生产的同位素。但ORNL仍可为一些单位提供靶的制备和辐照服务。基于回旋加速器所提供的同位素以短寿命同位素为主,无法长途运输,因此近年来有一种趋向,即在大居民中心建立回旋加速器以作为医学研究和生产同位素之用。例如阿贡肿瘤研究医院用CS-15型回旋加速器,生产了 ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F , ^{49}Cr , ^{67}Ga , ^{111}In , ^{127}Xe , ^{130}Cs , ^{202}Tl 等同位素。史隆-凯特琳肿瘤研究所的CS-15型回旋加速器于1960年出束,已用来生产各种化学态的20多种同位素,如 ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F , ^{30}P , ^{43}K , ^{48}Cr , ^{51}Cr , ^{52}Fe , ^{67}Ga , ^{73}Se , ^{81}Rb , ^{111}In , ^{123}I , ^{127}Cs , ^{167}Tm , ^{197}Hg , ^{206}Bi 等同位素。此外在美国原子能委员会宣布不再分配回旋加速器生产的同位素之后,在美国陆续建立了一些私人企业,专门供应给医院等单位以回旋加速器生产的同位素,这种私人企业有新英格兰核公司,同位素生产实验室,阿波脱实验室,坎布里奇核公司,哈斯汀放化工厂,国际化学和核公司等。据粗略统计在美国用于生产医用同位素的回旋加速器接近20台,是目前

利用回旋加速器生产医用同位素最多的国家。1971年美国用加速器生产的同位素的总销售额达3—4百万美元。

随着回旋加速器在生产医用同位素及医疗方面的作用日益增加，美国成立了一些专门生产回旋加速器的公司，如回旋加速器公司，阿里—帕尔默公司等。回旋加速器公司生产的CS-15, CS-22, CS-30等型号回旋加速器，不仅在美国，而且在西德、日本等国也向它购了几台作为生产同位素的工具。

2. 英国〔6〕

在英国用回旋加速器生产医用同位素的规模虽不如美国，但英国的哈默斯密斯医院的医用回旋加速器所做的工作都是很出色的。这台加速器于1955年建成。一部份时间用于快中子治癌，对快中子治癌的研究有很大贡献。约三分之二的时间用于医用同位素生产。

哈默斯密斯医院早在50年代后期，就开始用短半衰期的 ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O 同位素来作肺功能测定的研究，是这方面的先驱，还采用 Fe^{52} 对骨髓，用 As^{72} 和 As^{74} 对脑扫描，用 Bi^{206} 对网状内皮细胞等作了研究，并用之于临床。目前该医院用回旋加速器生产的医用同位素，基本上是供应英国国内的需要。可以分作三类， N^{13} 及 O^{15} 由于半衰期极短，只限于本医院使用， C^{11} 和 F^{18} 化合物可供应伦敦地区的其他医院，其它同位素以一星期为单位进行常规生产，送往英国国内各医院。该医院用回旋加速器进行常规生产的放射性同位素计有 C^{11} , N^{13} , O^{15} , F^{18} , K^{43} , Fe^{53} , Zn^{62} , Ga^{67} , Br^{77} , In^{111} , I^{123} , Cs^{129} , Pb^{203} 等，据1967年报道〔7〕，该医院已可用回旋加速器生产40多种同位素和标记化合物。

英国放化中心（阿默沙姆）于1965年建立了一台可变量回旋加速器，是专门为制造放射性同位素设计的。凡哈默斯密斯医院已常规生产的医用同位素，原则上都移交放化中心进行生产供应。哈默斯密斯

医院侧重于临床应用方面的研究探索工作，也负担一部份生产供应任务，但并不负责供应全部在该台加速器上曾生产过的同位素，而放化中心则是英国的放射性同位素的主要供应单位。此外哈威尔的一台1·75米直径的可变能量加速器也可负担一部份放射性同位素的制备任务。

三日本〔8〕

日本自70年代以来，已先后建立了二台医用回旋加速器。一台建在千叶大学医学部的辐射学研究所，是从法国进口的汤普森—CSF型，1974年出京。一台建在东京大学医学研究所，是由美国进口的CS-30型，于1973年出京。这二台加速器都是专门用于医用目的。一方面准备用于快中子治癌和放射生物学方面的研究，另一方面是为了生产医用放射性同位素。另外在埼玉的理化学研究所是日本最早进行用回旋加速器生产同位素的单位，曾用他们的回旋加速器生产了 ^7Be ， ^{11}C ， ^{13}N ， ^{15}O ， ^{18}F ， ^{43}K ， ^{52}Fe ， ^{67}Ga ， ^{77}Br ， ^{111}In ， ^{203}Pb 等同位素。总的看来日本在用回旋加速器生产同位素方面还处于起步阶段。

四苏联〔9〕

苏联最初用回旋加速器生产同位素的是库尔卡托夫原子能研究所，当时生产了 ^{24}Na ， ^{42}K 等短寿命同位素。但是在60年代以前，苏联用加速器生产同位素的规模不大，主要在原子能所，物理技术所，及乌克兰物理研究所等进行过一些工作。目前主要集中在物理力能所进行，利用核所的1·5米回旋加速器，可生产40多种同位素。

五西德

西德同位素生产和研究工作，主要集中于卡尔斯鲁厄核研究中心。于1962年即在该中心建立一台2·2米直径的大型回旋加速器，专门用于同位素生产，该加速器能把质子加速到26 Mev，氘束到52 Mev， α 到104 Mev。

七十年代后，先后在三个医学中心建立了专用的医用回旋加速器，

一台在海德堡的核医学研究所（1972建成），一台在哈诺威的高等医学院（73年建成），一台在埃森医院（74年建成）。这些医用回旋加速器的建成使西德在医用同位素的研究工作方面往前跨了一大步。

六、法国

法国的同位素生产主要集中在萨克莱核研究中心，另外在格兰诺布尔也开展部份工作，在二地都有回旋加速器，常用于生产一些反应堆所不生产的同位素。70年起在奥尔赛医院建造一台专用于生产同位素的医用回旋加速器。

七、比利时、荷兰

比利时在卢万大学有一台 $2 \cdot 15$ 米回旋加速器，能把质子加速到80 Mev，氦束40 Mev，关于用这台加速器生产放射性同位素的工作时有报道。74年列日大学又建立一台主要用于同位素生产的回旋加速器。

荷兰有五台回旋加速器，大部份是菲利普型。其中阿姆斯特丹大学核物理研究所为 $1 \cdot 4$ 米，格罗宁根大学为 $2 \cdot 8$ 米回旋加速器，均经常用于生产同位素。此外在贝登，还有一所名为回旋加速器和同位素实验室的私营公司。可以供应荷兰各医院回旋加速器所生产的同位素。这台加速器能把质子束加速到30 Mev，氦束到16 Mev， α 束到32 Mev。这台加速器于1967年建成，建成后85%时间用于同位素生产，5%时间用于活化分析，10%时间用于加速器改进。

在各医疗中心纷纷建立自己的医用回旋加速器设备，以用于生产医用同位素，开展中子治疗和放射生物研究。与此同时各发达的资本主义国家竞相建立专门制造轻巧的回旋加速器的公司，其产品在市场上竞争颇为激烈，这些公司中以美国的回旋加速器公司所生产的型号和数量为最多，其生产型号计有CS-115，CS-22，CS-30，CV-28，CV-40，CV-70等型号。它们生产的回旋加速器在美国已有近20台

在运行中，在日本和西欧也获得了一定市场，在西德有 AEG 公司，在法国有汤普生公司，在荷兰有飞利浦公司，在瑞典有斯堪的特隆公司等。他们所生产的产品技术指标如表 1 所示。

表 3 回旋加速器所生产的一些同位素

同位素	半衰期	衰变方式和射线能量	生产所用的反应	用
^{11}C	20.3 分	β^+ 20.9 MeV γ : 0.51 (康普顿线)	$^{11}\text{B}(\text{p}, \text{n})$ $^{10}\text{B}(\text{d}, \text{n})$ $^{11}\text{B}(\text{d}, 2\text{n})$ $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{n})$ $^{12}\text{C}(\text{d}, \text{n})$	测定 CO_2 呼吸和肺呼吸情况 及测定血流量等
^{13}N	10 分	β^+ 1.19 γ : 0.51	$^{14}\text{N}(\text{d}, \text{n})$	用以观察局部肺呼吸情况和测定血流量
^{15}O	123 秒	β^+ 1.74 γ : 0.51	$^{14}\text{N}(\text{d}, \text{n})$	测定心脏分流和局部肺血流量
^{18}F	110 分	β^+ 0.65 γ : 0.51	$^{18}\text{O}(\text{a}, \text{pn})$ $^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})$ $^{20}\text{Ne}(\text{p}, \text{n})$ $^{20}\text{Ne}(\text{d}, \text{a})$ $^{19}\text{F}(\text{p}, \text{n})$	测定骨损害情况
^{23}Mg	21.2 小时	β^- : 0.45 γ : 0.03, 0.40, 0.95, 1.35	$^{23}\text{Mg}(\text{p}, \text{n})$ $^{23}\text{Mg}(\text{a}, 2\text{p})$ $^{27}\text{Al}(\text{a}, 3\text{p})$	
^{43}K	22.4 小时	β^- : 0.82, 0.46	$^{40}\text{Ar}(\text{a}, \text{p})$	用于研究代谢作用
^{51}Cr	8.2 小时	β^- : 0.80 γ : 0.16, 0.51	$^{50}\text{Cr}(\text{a}, 2\text{n})$ $^{50}\text{Cr}(\text{p}, \text{n})$ $^{55}\text{Mn}(\text{p}, 4\text{n})$	骨髓扫描
^{52}Mn	5.6 天	EC, β^+ γ : 0.73	$^{52}\text{Cr}(\text{d}, 2\text{n})$	
^{57}Co	270 天	γ : 0.12	$\text{Fe}(\text{d}, \text{xn})$ $^{60}\text{Ni}(\text{p}, \text{a})$	用于标记维生素 B_{12}
^{65}Zn	9.13 小时	β^+	$^{60}\text{Ni}(\text{a}, 2\text{n})$	用于研究胰腺疾病
^{64}Cu	12.8 小时	$\text{EC}, \beta^+, \beta^-$ γ : (1.34)	$^{60}\text{Zn}(\text{d}, \text{a})^{64}\text{Cu}$	
^{67}Cu	58.5 小时	β^- γ : 0.18	$^{68}\text{Zn}(\gamma, \text{p})$	
^{67}Ga	78 小时	γ : 0.18, 0.30	$\text{Zn}(\text{p}, \text{xn})$ $\text{Zn}(\text{d}, \text{xn})$	用于肿瘤诊断
^{68}Ga	68 分	EC, β^+	^{68}Ge 子体	"
^{68}Ge	276 天	EC	$^{68}\text{Zn}(\text{a}, 2\text{n})^{68}\text{Ge}$	
^{72}As	26 小时	EC, β^+ γ : (0.63, 0.84)	$^{68}\text{Ga}(\text{a}, \text{n})^{72}\text{As}$	脑扫描
^{72}As	17.5 天	EC, β^+ γ : 0.6	$^{72}\text{Ge}(\text{d}, 2\text{n})^{72}\text{As}$ $^{72}\text{Ge}(\text{d}, \text{n})^{72}\text{As}$	"

同位素	半衰期	衰变方式和射线能量	生产所用反应	用途	参考文献
^{76}Se	8.4天	Ec	$^{70}\text{Ge}(\text{d}, 2\text{n})^{76}\text{Se}$		
^{77}Br	57小时	$\gamma: 0.24, 0.52$	$^{76}\text{As}(\alpha, 2\text{n})^{77}\text{Br}$ ^{77}Kr 子体	研究电介平衡	
^{77}Kr	1.2小时	β^+	$^{76}\text{Se}(\text{d}, 3\text{n})^{77}\text{Kr}$	测定血流量	
^{81}Kr	13秒	$\gamma: 0.19$	^{81}Rb 子体		
^{84}Kr	1.86小时	$\gamma: 0.01$	$^{84}\text{Kr}(\text{d}, \text{p})$		
^{84}Rb	4.7小时	β^+ $\gamma: 0.250, 0.45, 0.51, 1.10$	$^{81}\text{Br}({}^3\text{He}, 3\text{n})$ $^{79}\text{Br}(\text{d}, 2\text{n})$		
^{86}Rb	6.3小时	β^+ $\gamma: 0.55, 0.78$	$^{81}\text{Br}({}^3\text{He}, 2\text{n})$		
^{83}Br	83天	$\gamma: 0.53$	$\text{Kr}(\text{p}, \text{xn})$		
^{86}Sr	3.2天	$\gamma: 0.51$	$^{86}\text{Rb}(\text{p}, \text{n})$ $^{86}\text{Rb}(\text{d}, 2\text{n})$	骨扫描	
^{87}Sr	2.83h	$\gamma: 0.39$	^{87}Y 子体	骨扫描	
^{87}Y	80小时	$\gamma: 0.48$	$^{86}\text{Rb}(\alpha, 2\text{n}) \rightarrow ^{87}\text{m}\text{Sr}$		
^{99}Mo	66.7小时	β^- $\gamma: 0.74$	$^{100}\text{Mo}(\text{p}, \text{pn}) \rightarrow ^{99}\text{m}\text{Tc}$		
$^{99}\text{m}\text{Tc}$	6.05小时	$\gamma: 0.14$	^{99}Mo 子体		
^{111}In	2.8天	$\gamma: 0.17, 0.26$	$\text{Cd}(\text{p}, \text{xn})$ $^{111}\text{Cd}(\text{p}, \text{n})$	肿瘤定位	
$^{117}\text{m}\text{Sn}$	14天	$\gamma: 0.16$	$^{114}\text{Cd}(\alpha, \text{n})$	骨扫描	
^{117}Sb	2.8小时	β^+ $\gamma: 0.16, 0.51$	$^{116}\text{In}(\alpha, 2\text{n})$	研究肝脏肿瘤	
^{123}I	13.3小时	$\gamma: 0.16$	$^{122}\text{Te}(\text{d}, \text{n})$ $^{123}\text{Te}(\text{p}, \text{n})$ $^{121}\text{Sb}(\text{d}, 2\text{n})$ $^{123}\text{Sb}({}^3\text{He}, 3\text{n})$ ^{123}Xe 子体	甲状腺扫描	
^{133}Xe	2.08小时	β^+ $\gamma: 0.15$	$^{132}\text{Te}(\alpha, 3\text{n})$ $^{122}\text{Te}({}^3\text{He}, 2\text{n})$ $^{122}\text{Te}({}^3\text{He}, 3\text{n})$ $^{127}\text{I}(\text{p}, 5\text{n})$ $\text{Xe}(\text{p}, \text{xn})$		
^{127}Xe	33.4小时	$\gamma: 0.17, 0.20, 0.38$	$^{127}\text{I}(\text{d}, 2\text{n})$	研究肺功能	
^{127}Cs	6.2小时	β^+ $\gamma: 0.12, 0.30, 0.51$	$^{127}({}^3\text{He}, 3\text{n})$		
^{126}Cs	3.8分	β^+ $\gamma: 0.44, 0.51$	^{126}Ba 子体		
^{130}Cs	32.7小时	$\gamma: 0.38, 0.41$	$^{127}\text{I}(\alpha, 2\text{n})$		

同位素	半衰期	衰变方式和射线能量	生产所用的反应	用	途	参考文献
^{130}Cs	29.1分	Ec, β^+	$^{137}\text{I}(\alpha, n)$		测察冠状动脉血流及心脏扫描	
^{157}Dy	8.1小时	$\gamma: 0.33$	$^{160}\text{Tb}(\text{p}, 3n)$ $^{160}\text{Gd}(\alpha, 2n)$		骨扫描和骨髓照相	
^{167}Tm	9.6天	$\gamma: 0.21$	$^{167}\text{Er}(\text{p}, n)$		骨扫描	
$^{167\text{m}}\text{Hg}$	24小时	$\gamma: 0.13$				
^{167}Hg	6.5小时	$\gamma: 0.08, 0.27$	$^{167}\text{Au}(\text{p}, n)$		肾脏扫描	
^{199}Tl	7.4小时	$\gamma: 0.21, 0.46$	γ			
^{201}Tl	74小时	$\gamma: 0.17$	$\text{Hg}(\text{p}, xn)$			
^{201}pb	9.4小时	$\gamma: 0.33$	$\text{Hg}(\alpha, xn)$			
^{203}pb	52.1小时	$\gamma: 0.28, 0.40$	$^{203}\text{Tl}(\text{p}, 3n) \rightarrow ^{203}\text{pb}$			
^{203}Bi	11.8小时	$\gamma: 0.6-1.9$	$^{203}\text{Tl}(\text{d}, 2n)$ $^{203}\text{Ti}(\text{p}, n)$		标记红细胞	
			$^{203}\text{Tl}(^3\text{He}, 3n)$ ^{203}Bi $\rightarrow ^{203}\text{pb}$			
^{203}Bi	6.4天	Ec $\gamma: 0.80$	$^{203}\text{pb}(\text{p}, 3n)$		脑肿瘤定位 和细胞研究	

4. 回旋加速器生产的同位素的医学应用简介 (参见表 3)。

除 ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O 外, 按照它们在元素周期表上所处的位置, 分组介绍。把 ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O 单独列出来叙述是因为它们的半衰期是加速器所生产的同位素中最短的, 它们可以以气体形式用连续生产的方式产生出来, 而且生产这三种同位素所要求的入射粒子的能量都较低, 它们是生物机体的主要构成元素, 当它们衰变时, 由于正电子的湮灭, 而产生两个 0.51Mev 的光子便于探测。

^{11}C 由于 ^{11}C 是很早就由回旋加速器中生产出来的同位素, 有很多材料报道过 ^{11}C 在生物和医学方面的应用。至今 ^{11}C 还仍然是很多人关心的对象。 ^{11}C 标记的 ^{11}CO 和 $^{11}\text{CO}_2$ 可以很容易地用能产生 7Mev 氦束的小回旋加速器生产毫居数量级的量。 ^{11}C 标记的 $^{11}\text{CO}_2$ 也可以作为合成其它标记化合物的中间体。也有很多工作介绍了 ^{11}C 标记的氟化物如 H^{11}CN , Na^{11}CN , K^{11}CN 等。

^{11}C 的半衰期是 20.4 分, 衰变时放出 $\sim 100\%$ 能量为 0.972Mev 的正电子, 正电子湮灭时放出 0.51Mev 的 γ 光子, 可以很容易地用一个探测器测定, 或用二个探测器作符合测定而能作精确空间定位。

事实上 ^{11}C 早在 ^{14}C 发现以前就在生物实验中被用作放射性示踪元素, 很多有机化合物, 如葡萄糖, 乳糖, 丁二酸, 肾上腺素等都曾用 ^{11}C 标记作过研究。 ^{11}CO 和 $^{11}\text{CO}_2$ 曾被广泛地用于人体检验, 用外部扫描方法来测定血液郁积, 测定血量和研究肺功能。

用 7Mev 的氦束轰击 B_2O_3 靶, 通过 $^{11}\text{B}(\text{d}, \text{n})^{11}\text{C}$ 反应产生 ^{11}C 气体, ^{11}C 以 ^{11}CO 或 $^{11}\text{CO}_2$ 的气体形式从固体靶中逸出, 逸出的气体可直接用惰性气体带出, 或在辐射以后收集。如果需要的是 ^{11}CO , 就将逸出的混合气体通过碱石灰, 以除去 $^{11}\text{CO}_2$ 。如需要 $^{11}\text{CO}_2$ 可用催化剂氧化 ^{11}CO 。

^{13}N — ^{13}N 的半衰期是10分，衰变的放出1.79Mev的正电子。 ^{13}N 被用于测定肺功能和血流量。

可用 $^{13}\text{C}(\text{d}, \text{n})^{13}\text{N}$ 反应来生产 ^{13}N 。所用的氘束能量为14Mev，使用石墨靶，用 CO_2 气流连续通入靶室，并把 $^{13}\text{N}_2$ 带出，并用氢氧化钠加以吸收。 ^{13}N 的产额与所用束流的功率密度有很大关系，因为只有在石墨靶达到很高温度时，才能放出 ^{13}N 气体。

近年来报道过很多以 ^{13}N 标记铵的工作，用以观察心肌衰弱。

^{15}O — ^{15}O 的半衰期是123秒，衰变时放出能量为1.74 Mev的正电子。

由于氧在血液中能高度溶解，因此常用 ^{15}O 来测量心脏的分流和局部肺血流量。

^{15}O 可用7.5 Mev的氘束，用 $^{14}\text{N}(\text{d}, \text{n})^{15}\text{O}$ 反应来生产。 ^{15}O 可用作标记 C^{15}O_2 或碳酸。

0族元素的放射性同位素

氩和氙的放射性同位素常被用于研究肺的呼吸作用和测定各种机体的血流量。由回旋加速器可生产 $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ， $^{83\text{m}}\text{Kr}$ ， $^{85\text{m}}\text{Kr}$ 和 ^{137}Xe 等。

$^{81\text{m}}\text{Kr}$ 是由 ^{81}Rb (β)衰变而来，其半衰期是13秒，由 $^{81}\text{Rb} \rightarrow ^{81\text{m}}\text{Kr}$ 发生弱可得到毫居级的气相或液相的 $^{81\text{m}}\text{Kr}$ 。 ^{81}Rb 可用 α 束轰击溴化钠靶而得到。

^{127}Xe 可用氘束轰击溴化钠靶而获得。

I族元素的放射性同位素

在此族元素内 ^{43}K 是近年内被使用较多的一个同位素，常被用于电介质平衡的研究和心脏照相。 ^{43}K 虽也可以从反应堆中生产，但用回旋加速器来生产比较便宜，而且质量较好。 ^{43}K 可用10Mev以上的 α 束轰击氯靶获得。

^{139}Cs 和 ^{137}Cs 可用来观察心脏冠状动脉血流情况和心脏扫描，二者都可

用 α 束轰击硫化钠靶而获得。 ^{123}Cs 也可由 ^{123}Ba 衰变而来。

II族元素的放射性同位素

^{86}Sr 和 $^{87\text{m}}\text{Sr}$ 在医学上有广泛应用，特别在骨损伤的测定方面， ^{86}Sr 可用13Mev的氦束轰击 RbCl 靶获得。 $^{87\text{m}}\text{Sr}$ 由加速器生产的同位素 ^{87}Y 衰变得到。

^{128}Ba 是生产 ^{128}Cs 的母体，同时也是骨扫描的示踪药物。但这是用重离子反应($\text{Sb}(^{11}\text{B}, \text{xn})^{128}\text{Ba}$)所生产的同位素。

^{62}Zn 被用于脏器等各种医学研究，可用30Mev的 α 束轰击镍靶取得。

^{197}Hg 和 $^{197\text{m}}\text{Hg}$ 可用于肺部肿瘤的探测和肾脏扫描。 ^{197}Hg 可用12.5Mev的质子束轰击金靶得到；金靶在被轰击后放在真空中加热到500—600°C，汞蒸汽逸出后被吸附在以液氮冷却的小量王水中。

III族元素的放射性同位素

^{87}Y 是 $^{87\text{m}}\text{Sr}$ 的母体，后者被广泛用于骨扫描，可用32Mev α 束轰击 RbCl 靶获得 ^{87}Y 。

^{157}Dy (镨)可用于骨扫描和骨髓照相。 ^{157}Dy 可用镱靶由 ^{159}Tb (p, 3n) ^{157}Dy 反应，或用钆靶由 $^{155}\text{Gd}(\alpha, 2n)^{157}\text{Dy}$ 产生。

^{157}Tm (铥)也可用于骨照相。 ^{157}Tm 可用15Mev的质子束轰击 Er_2O_3 靶而获得。

^{67}Ga 是近年来广泛应用于软组织肿瘤诊断的一种同位素，其核性质源于反应堆生产的低比反同位素 ^{68}Ga 。在回旋加速器上可用质子束轰击天然轰击镓靶产生，伴生的 ^{68}Ga 由于寿命更短，可在生产后冷却几天，待其自然衰变除去。 ^{66}Ga 也可由加速器生产的 ^{66}Ge 衰变得到。

^{111}In 可用于肿瘤定位。可用 α 束轰击铟靶，或用15Mev的质子束轰击镓靶获得。

IV族元素的放射性同位素