

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G21C 3/28 (2006.01)

G21C 3/328 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200680006402.6

[43] 公开日 2008年2月20日

[11] 公开号 CN 10112885A

[22] 申请日 2006.2.17

[21] 申请号 200680006402.6

[30] 优先权

[32] 2005.2.28 [33] JP [31] 052759/2005

[86] 国际申请 PCT/JP2006/302876 2006.2.17

[87] 国际公布 WO2006/092970 日 2006.9.8

[85] 进入国家阶段日期 2007.8.28

[71] 申请人 三菱重工业株式会社

地址 日本东京

[72] 发明人 滨崎学 星雅也 田渊士郎

[74] 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司

代理人 李贵亮

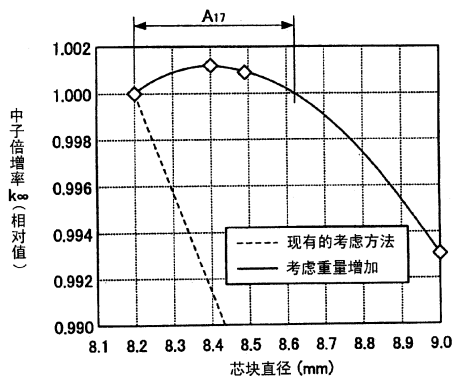
权利要求书 2 页 说明书 19 页 附图 14 页

[54] 发明名称

压水型原子反应堆的燃料集合体及燃料集合体的设计方法

[57] 摘要

本发明提供一种压水型原子反应堆的燃料集合体及燃料集合体的设计方法，其中将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，且多个燃料棒被集束成格子状而构成燃料集合体，并通过燃料芯块的外径增加，在燃料集合体中装载的铀的重量增加，求出区域(A)，在该区域(A)中，与铀重量增加相伴的燃烧度的降低产生的反应度的增加部分超过因燃料芯块外径的增加导致的减速材料的减少所带来的减速不足产生的反应度的降低部分，并在该反应度超出的区域(A)内设定燃料芯块的外径。



1. 一种压水型原子反应堆的燃料集合体，其如下这样构成，即，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，多个该燃料棒被集束成格子状而构成，

其特征在于，

通过所述燃料芯块的外径增加，产生在所述燃料集合体中装载的所述铀的重量的增加，求得粗径化增益区域，在该区域中，与所述铀的重量增加相伴的燃烧度的降低引起的反应度的增加量超过因为所述燃料芯块外径的增加导致的减速材料的减少所带来的减速不足而产生的反应度的降低量，在所述反应度超出的粗径化增益区域内设定所述燃料芯块的外径。

2. 如权利要求 1 所述的压水型原子反应堆的燃料集合体，其特征在于，

所述反应度超出的粗径化增益区域是如下这样的区域，即：即使因所述燃料芯块的外径的增加而导致分批燃烧度降低，也以超过分批燃烧度的相对的降低量的方式使循环燃烧度降低。

3. 一种压水型原子反应堆的燃料集合体，其如下这样构成，即，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，多个该燃料棒被集束成格子状而构成，

其特征在于，

在所述多个燃料棒以 17×17 的正方格子状、且燃料棒间距为 12.6mm 进行排列的情况下，所述燃料芯块的外径设定为大于 8.25mm、且在 8.62mm 以下。

4. 一种压水型原子反应堆的燃料集合体，其如下这样构成，即，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，多个该燃料棒被集束成格子状而构成，

其特征在于，

在所述多个燃料棒以 15×15 的正方格子状、且燃料棒间距为 14.3mm 进行排列的情况下，所述燃料芯块的外径设定为大于 9.35mm、且在

10.11mm 以下。

5. 一种压水型原子反应堆的燃料集合体，其如下这样构成，即，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，多个该燃料棒被集束成格子状而构成，

其特征在于，

在所述多个燃料棒以 14×14 的正方格子状、且燃料棒间距为 14.1mm 进行排列的情况下，所述燃料芯块的外径设定为大于 9.35mm、且在 9.64mm 以下。

6. 一种燃料集合体的设计方法，所述燃料集合体是压水型原子反应堆的燃料集合体，其如下这样构成，即，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，多个该燃料棒被集束成格子状而构成，

所述燃料集合体的设计方法的特征在于，

通过使所述燃料芯块的外径增加，使在所述燃料集合体中装载的所述铀的重量增加，求出粗径化增益区域，在该区域中，与所述铀的重量增加相伴的燃烧度的降低引起的反应度的增加量超过因为所述燃料芯块外径的增加导致的减速材料的减少所带来的减速不足而产生的反应度的降低量，在所述反应度超出的粗径化增益区域内设定所述燃料芯块的外径。

7. 如权利要求 6 所述的燃料集合体的设计方法，其特征在于，

所述反应度超出的粗径化增益区域是如下这样的区域，即：即使因所述燃料芯块的外径的增加而导致分批燃烧度降低，也以超过分批燃烧度的相对的降低量的方式使循环燃烧度降低。

压水型原子反应堆的燃料集合体及燃料集合体的设计方法

技术领域

本发明涉及压水型原子反应堆的燃料集合体及燃料集合体的设计方法，尤其涉及通过燃料芯块的粗径化实现反应性的提高。

背景技术

在压水型原子反应堆（PWR：Pressurized Water Reactor）中，将轻水作为原子反应堆冷却材料及中子减速材料使用，且贯穿反应堆芯整体后变为不沸腾的高温高压水，并将该高温高压水送往蒸汽产生器，通过热交换产生蒸汽，并将该蒸汽送往涡轮发电机进行发电。

在此种压水型原子反应堆中，在原子反应堆容器内，收容有规定数量的在多个燃料棒之间插入规定数的控制棒并排列成格子状的燃料集合体。该燃料集合体例如由形成 17×17 正方形排列的 264 根燃料棒、1 根反应堆内检测仪器引导管道、和 24 根控制棒引导管道构成。并且，该燃料棒形成为将低浓缩二氧化铀的烧结芯块插入锆合金被覆管，并加压封入氦的密封构造。

然而，在原子反应堆中，反应堆芯寿命从燃料棒的燃烧特性进行推定，为实现高燃烧度化，提出了各种使燃烧棒的性能提高的方案。例如，在下述专利文献 1 中，在被覆管内重叠多个二氧化铀芯块，由上部端栓与下部端栓对内部进行密封，且通过使设置在下部端栓内的中空部与被覆管的内部连通，扩大气体空间容积，可进行高燃烧度化运转。

专利文献 1：日本特开平 11-142560 号公报

燃料集合体的燃烧度依赖于燃料棒的性能，根据反应堆芯热输出、运转期间、最高燃烧度等决定燃料装载重量，并由该燃料装载重量决定燃料棒的根数、长度、直径（芯块的直径），并根据铀和轻水的比率与燃料经济性的关系决定燃料棒间距。在此情况下，芯块的直径根据基于铀与轻水

的比率的减速率进行设定，但总要求提高燃料经济性，并期望提高燃料的反应度。

发明内容

本发明为解决上述问题，目的在于提供一种通过利用燃料芯块的直径的最佳化使反应度提高，从而可延长反应堆芯寿命的压水型原子反应堆的燃料集合体及燃料集合体的设计方法。

为达到上述目的的第一方面的发明的压水型原子反应堆的燃料集合体，其如下这样构成，即，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，多个该燃料棒被集束成格子状而构成，其特征在于，通过所述燃料芯块的外径增加，产生在所述燃料集合体中装载的所述铀的重量的增加，求得粗径化增益区域，在该区域中，与所述铀的重量增加相伴的燃烧度的降低引起的反应度的增加量超过因为所述燃料芯块外径的增加导致的减速材料的减少所带来的减速不足而产生的反应度的降低量，在所述反应度超出的粗径化增益区域内设定所述燃料芯块的外径。

在第二方面的发明的压水型原子反应堆的燃料集合体中，所述反应度超出的粗径化增益区域是如下这样的区域，即：即使因所述燃料芯块的外径的增加而导致分批燃烧度降低，也以超过分批燃烧度的相对的降低量的方式使循环燃烧度降低。

第三方面的发明的压水型原子反应堆的燃料集合体，其如下这样构成，即，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，多个该燃料棒被集束成格子状而构成，其特征在于，在所述多个燃料棒以 17×17 的正方格子状、且燃料棒间距为 12.6mm 进行排列的情况下，所述燃料芯块的外径设定为大于 8.25mm、且在 8.62mm 以下。

第四方面的发明的压水型原子反应堆的燃料集合体，其如下这样构成，即，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，多个该燃料棒被集束成格子状而构成，其特征在于，在所述多个燃料棒以 15×15 的正方格子状、且燃料棒间距为 14.3mm 进行排列的情况下，所述燃料芯块的外径设定为大于 9.35mm、且在 10.11mm 以下。

第五方面的发明的压水型原子反应堆的燃料集合体，其如下这样构成，即，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，多个该燃料棒被集束成格子状而构成，其特征在于，在所述多个燃料棒以 14×14 的正方格子状、且燃料棒间距为 14.1mm 进行排列的情况下，所述燃料芯块的外径设定为大于 9.35mm 、且在 9.64mm 以下。

第六方面的发明的燃料集合体的设计方法，所述燃料集合体是压水型原子反应堆的燃料集合体，其如下这样构成，即，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，多个该燃料棒被集束成格子状而构成，所述燃料集合体的设计方法的特征在于，通过使所述燃料芯块的外径增加，使在所述燃料集合体中装载的所述铀的重量增加，求出粗径化增益区域，在该区域中，与所述铀的重量增加相伴的燃烧度的降低引起的反应度的增加量超过因为所述燃料芯块外径的增加导致的减速材料的减少所带来的减速不足而产生的反应度的降低量，在所述反应度超出的粗径化增益区域内设定所述燃料芯块的外径。

第七方面的发明的燃料集合体的设计方法中，其特征在于，所述反应度超出的粗径化增益区域是如下这样的区域，即：即使因所述燃料芯块的外径的增加而导致分批燃烧度降低，也以超过分批燃烧度的相对的降低量的方式使循环燃烧度降低。

发明效果

根据第一方面的发明的压水型原子反应堆的燃料集合体，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，且多个该燃料棒被集束成格子状而构成燃料集合体，通过燃料芯块的外径增加，产生在该燃料集合体中装载的铀的重量的增加，并求出粗径化增益区域，在该区域中，与该铀的重量增加相伴的燃烧度的降低引起的反应度的增加部分超过因为燃料芯块外径的增加导致的减速材料的减少所带来的减速不足所产生的反应度的降低部分，在该反应度超出的粗径化增益区域内设定燃料芯块的外径。如果增大燃料芯块的外径，则由于减速材料量的减少，减速发生恶化，从而反应度降低，但因为铀装载量增加，燃烧度降低，所以反应度增加，在此两者的关系中，存在因燃料芯块的外径的增加、即铀重量增加所引起的反应度的增加量超过由于减速材料的减少带来的

减速不足所造成的反应度的降低量的区域，通过在该区域内设定燃料芯块的外径，从而燃料芯块的直径被最佳化，能够使反应度增加，从而延长反应堆芯寿命。

根据第二方面的发明的压水型原子反应堆的燃料集合体，因为将反应度超出的粗径化增益区域设为即使因燃料芯块的外径增加导致分批燃烧度降低，也以超过分批燃烧度的相对的降低量的方式使循环燃烧度降低的区域，所以循环燃烧度的降低量超过因燃料芯块的直径的增加导致的分批燃烧度的降低量的区域，是能够使燃料棒的替换根数减少的区域，并能够使经济性提高。

根据第三方面的发明的压水型原子反应堆的燃料集合体，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，构成将多个该燃料棒被集束成格子状而构成的燃料集合体，在多个燃料棒以 17×17 的正方格子状、且燃料棒间距为 12.6mm 进行排列的情况下，燃料芯块的外径设定为大于 8.25mm、且在 8.62mm 以下，所以在 17×17 型的燃料集合体中，燃料芯块的直径被最佳化，且能够使反应度增加。

根据第四方面的发明的压水型原子反应堆的燃料集合体，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，构成将多个该燃料棒被集束成格子状而构成的燃料集合体，在多个燃料棒以 15×15 的正方格子状、且燃料棒间距为 14.3mm 进行排列的情况下，燃料芯块的外径设定为大于 9.35mm、且在 10.11mm 以下，所以在 15×15 型的燃料集合体中，燃料芯块的直径被最佳化，且能够使反应度增加。

根据第五方面的发明的压水型原子反应堆的燃料集合体，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，构成将多个该燃料棒被集束成格子状而构成的燃料集合体，因为在多个燃料棒以 14×14 的正方格子状、且燃料棒间距为 14.1mm 进行排列的情况下，燃料芯块的外径设定为大于 9.35mm、且在 9.64mm 以下，所以在 14×14 型的燃料集合体中，燃料芯块的直径被最佳化，且能够使反应度增加。

根据第六方面的发明的燃料集合体的设计方法，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块填充在锆合金制的覆盖管从而形成燃料棒，且多个该燃料棒被集束成格子状而构成燃料集合体，通过使燃料芯块的外径增加，使在

该燃料集合体中装载的铀的重量增加，并求出粗径化增益区域，在该区域中，与该铀的重量增加相伴的燃烧度的降低引起的反应度的增加部分超过因为燃料芯块外径的增加导致的减速材料的减少所带来的减速不足所产生的反应度的降低部分，在该反应度超出的粗径化增益区域内设定燃料芯块的外径。如果增大燃料芯块的外径，则由于减速材料量的减少，减速发生恶化，从而反应度降低，但因为铀装载量增加，燃烧度降低，所以反应度增加，在此两者的关系中，存在因燃料芯块的外径的增加、即铀重量增加所引起的反应度的增加量超过由于减速材料的减少带来的减速不足所造成的反应度的降低量的区域，通过在该区域内设定燃料芯块的外径，从而燃料芯块的直径被最佳化，能够使反应度增加，从而延长反应堆芯寿命。

根据第七方面的发明的燃料集合体的设计方法，因为将反应度超出的粗径化增益区域设为：即使因燃料芯块的外径的增加而导致分批燃烧度降低，也以超过分批燃烧度的相对降低量的方式使循环燃烧度降低的区域，所以循环燃烧度的降低部分超过燃料芯块的直径的增加导致的部分燃烧度的降低部分的区域，是能够使燃料棒的替换根数减少的区域，并能够使经济性提高。

附图说明

图1是具有本发明的实施例1所述的压水型原子反应堆的发电设备的概略结构图。

图2是表示实施例1的压水型原子反应堆的内部构造的概略结构图。

图3是表示压水型原子反应堆的反应堆芯构造的示意图。

图4是实施例1的压水型原子反应堆的燃料集合体的概略结构图。

图5是表示实施例1的压水型原子反应堆的燃料集合体中的排列结构的概略剖面图。

图6是实施例1的压水型原子反应堆的燃料集合体中的燃料棒的局部剖面图。

图7是表示实施例1的压水型原子反应堆的燃料集合体中的燃料棒的详细的主要部分剖面图。

图8是表示中子倍增率相对于 17×17 型燃料集合体的燃烧度的图表。

图 9 是表示中子倍增率相对于燃料芯块直径的图表。

图 10 是表示循环燃烧度及分批 (batch) 燃烧度相对于燃料芯块直径的降低比例的图表。

图 11 是表示燃料芯块直径的最佳区域的图表。

图 12 是表示中子倍增率相对于本发明的实施例 2 所述的压水型原子反应堆中的 15×15 型燃料集合体的燃烧度的图表。

图 13 是表示中子倍增率相对于燃料芯块直径的图表。

图 14 是表示燃料芯块直径的最佳区域的图表。

图 15 是表示中子倍增率相对于本发明的实施例 3 所述的压水型原子反应堆中的 14×14 型燃料集合体的燃烧度的图表。

图 16 是表示中子倍增率相对于燃料芯块直径的图表。

图 17 是表示燃料芯块直径的最佳区域的图表。

图中，

12—压水型原子反应堆；31—原子反应堆容器；39—反应堆芯；40—燃料集合体；45—控制棒驱动装置；47—控制棒（控制棒群）；49—反应堆内检测仪器引导管；51—燃料棒；55—控制棒引导管道；56—反应堆内检测仪器用引导管道；61—燃料棒；62—燃料被覆管； D_p —燃料芯块直径； D_r —燃料被覆管外径。

具体实施方式

以下参照附图，对本发明所述的压水型原子反应堆的燃料集合体及原子反应堆的适宜的实施例进行详细说明。而且，本实施例并不限定本发明。

实施例 1

图 1 是具有本发明的实施例 1 所述的压水型原子反应堆的发电设备的概略结构图，图 2 是表示实施例 1 的压水型原子反应堆的内部构造的概略结构图，图 3 是表示压水型原子反应堆的反应堆芯构造的示意图，图 4 是实施例 1 的压水型原子反应堆的燃料集合体的概略结构图，图 5 是表示实施例 1 的压水型原子反应堆的燃料集合体中的排列结构的概略剖面图，图 6 是实施例 1 的压水型原子反应堆的燃料集合体中的燃料棒的局部剖面图，图 7 是表示实施例 1 的压水型原子反应堆的燃料集合体中的燃料棒的

详细的主要部分剖面图，图 8 是表示相对于 17×17 型燃料集合体的燃烧度的中子倍增率的图表，图 9 是表示相对于燃料芯块直径的中子倍增率的图表，图 10 是表示循环燃烧度及分批燃烧度相对于燃料芯块直径的降低比例的图表，图 11 是表示燃料芯块直径的最佳区域的图表。

实施例 1 的原子反应堆是将轻水用作原子反应堆冷却材料及中子减速材料，贯穿反应堆芯整体后成为不沸腾的高温高压水，并将该高温高压水送往蒸汽产生器，通过热交换产生蒸汽，并将该蒸汽送往涡轮发电机进行发电的压水型原子反应堆（PWR: Pressurized Water Reactor）。

即，在具有该压水型原子反应堆的发电设备中，如图 1 所示，在原子反应堆容纳容器 11 内，收纳有压水型原子反应堆 12 及蒸汽产生器 13，该压水型原子反应堆 12 及蒸汽产生器 13 经由冷却水配管 14、15 进行连结，并在冷却水配管 14 上设置加压器 16，在冷却水配管 15 上设有冷却水泵 17。在此情况下，使用轻水作为减速材料及一次冷却水，为抑制反应堆芯部的一次冷却水发生沸腾，一次冷却系统通过加压器 16 施加 150~160 大气压左右的高压。从而，在压水型原子反应堆 12 中，利用低浓缩铀或 MOX 作为燃料对作为一次冷却水的轻水进行加热，且利用加压器 16 将高温的轻水维持在规定的压力，在该状态下，通过冷却水配管 14 将所述轻水送往蒸汽产生器。在该蒸汽产生器 13 中，高压高温的轻水与作为二次冷却水的水之间进行热交换，被冷却的轻水通过冷却水配管 15 返回压水型原子反应堆 12。

蒸汽产生器 13 经由冷却水配管 20、21 与设置在原子反应堆容纳容器 11 的外部的涡轮 18 及冷凝器 19 进行连结，在冷却水配管 21 上设有给水泵 22。此外，在涡轮 18 上连接发电机 23，并在冷凝器 19 上连接给排冷却水（例如，海水）的供给管 24 及配水管 25。从而，在蒸汽产生器 13 中与高压高温的轻水进行热交换而生成的蒸汽通过冷却水配管 20 被送往涡轮 18，并利用该蒸汽对涡轮 18 进行驱动，从而由发电机 23 进行发电。对涡轮 18 进行驱动的蒸汽在冷凝器 19 中被冷却后，通过冷却水配管 21，返回到蒸汽产生器 13。

此外，在压水型原子反应堆 12 中，如图 2 及图 3 所示，原子反应堆容器 31 为能够向其内部插入反应堆内构造物，由原子反应堆容器主体 32

与安装在其上部的原子反应堆容器盖 33 构成，且原子反应堆容器盖 33 相对于该原子反应堆容器主体 32 可开闭。原子反应堆容器主体 32 形成为上部开口、下部闭塞的圆筒形状，在内表面上固定有热屏蔽材料 34，并在上部形成有给排一次冷却水（轻水）的入口喷嘴 35 及出口喷嘴 36。

在该原子反应堆容器主体 32 内，通过上下的反应堆芯板 37、38 形成反应堆芯 39，并在内部插入多个燃料集合体 40。考虑燃料的更换顺序，该反应堆芯 39 被划分为三至四个区域（新燃料、1 循环照射燃料、2 循环照射燃料、3 循环照射燃料），且设计成保持 90 度的对称性。在本实施例中，设计成 17×17 型的燃料集合体 40 的形式，各燃料集合体的集合体间距 P_1 设定为 215mm。此外，在上部反应堆芯板 37 的上部，经由支柱 41 固定上部反应堆芯支撑板 42，在该上部反应堆芯支撑板 42 与上部反应堆芯 37 之间支撑多个控制棒群引导管 43。此外，在原子反应堆容器盖 33 上支撑有控制棒驱动装置 45，各控制棒群驱动轴 46 通过控制棒群引导管 43 内而延伸到燃料集合体 40，并在下部安装有控制棒群（控制棒）47。

另一方面，在下部反应堆芯板 38 的下部固定下部反应堆芯支撑板 48，并在该下部反应堆芯支撑板 48 上支撑反应堆内检测仪器引导管 49。

从而，利用控制棒驱动装置 45 移动控制棒群 47，通过将未图示的控制棒插入燃料集合体 40 中，由此，对在反应堆芯 39 内的核分裂进行控制，并利用产生的热能对填充到原子反应堆容器 31 内的轻水进行加热，高温的轻水从出口喷嘴 36 排出，并如上述地送往蒸汽产生器 13。即，作为构成燃料集合体 40 的燃料的铀或钚通过核分裂放出中子，作为减速材料及一次冷却水的轻水使放出的高速中子的动能降低而形成热中子，易引起新的核分裂，并且带走产生的热而冷却。此外，通过将控制棒群 47 插入燃料集合体 40，对在反应堆芯 39 内产生的中子数进行调整，此外，在紧急停止原子反应堆时，急速地插入反应堆芯内。

如图 4 及图 5 所示，该燃料集合体 40 如下构成，即：多个燃料棒 51 被支撑格子 52 集束成格子状，在上端部固定上部喷嘴 53，另一方面在下端部固定下部喷嘴 54。而且，图 5 中，因为复杂故省略燃料棒 51 间的格子部分，仅示意地图示了外周部。本实施例的燃料集合体 40 为 17×17 型，并由 264 根燃料棒 51、插入控制棒 47 的 24 根控制棒引导管道 55、

以及插入未图示的反应堆内检测仪器用检测器的一根反应堆内检测仪器引导管道 56 构成，且各燃料棒 51 的燃料棒间距 P_2 设定为 12.6mm。

并且，在燃料棒 51 中，如图 6 所示，燃料芯块 61 是对将作为核分裂性物质的铀 235 浓缩到 5% 以下的浓缩二氧化铀进行烧固，并形成芯块状。燃料被覆管 62 是锆合金制的，且在内部填充规定数的燃料芯块 61，并通过在上部安装弹簧 63 进行按压，同时在内部填充有氦气的状态下，在上端部及下端部固定端栓 64、65，由此形成燃料棒 51。

然而，在上述的压水型原子反应堆 12 中，为使该原子反应堆在规定期间可以维持恒定的热输出，对反应堆芯热输出、运转期间、燃料集合体的最高燃烧度进行设定，并由此决定需要的燃料装载重量。并且，考虑输出峰值系数 (peaking factor) 来决定燃料棒的根数、长度，由燃料装载重量与根数决定燃料棒的直径，以能够满足可维持燃料的健全性的最大线输出密度 (最大线出力密度)。然后，适当地选定燃料被覆管，考虑燃烧棒的特性 (照射成长、芯块变形、芯块温度、被覆管变形、FP 气体放出、被覆管腐蚀) 来决定燃料被覆管的内径及外径，以使即便在运转中的异常的过度变化时，仍确保燃料的健全性。另一方面，轻水对铀的体积比 (H/U 比) 与燃料经济性 (中子倍增率) 的关系为在 H/U 比达到某值时，中子倍增率具有极大值，而且成为凸曲线，在压水型原子反应堆中，如果以在减速材料 (轻水) 温度上升时中子倍增率降低的方式而处于最佳值的左侧，即如果 H/U 比进一步变大，则在中子倍增率增加的区域选定燃料棒间距。该技术记载于“轻水反应堆燃料的特性”第 27 页 (财团法人原子能安全研究协会 轻水反应堆燃料的特性编辑委员会 第四版平成 15 年 7 月)。因此，如果一旦选定燃料棒间距，则因为在反应堆芯内的相互关系被确定，所以能够最优化的燃料棒的直径的范围被严格地限定。

一般认为，在将燃料棒的间距固定的条件下，如果增大燃料棒 (燃料芯块) 的直径，则 H/U 比降低，即减速材料减少，减速恶化，且反应度降低。然而，在将燃料集合体的寿命中的产生热量设为恒定的情况下，如果增大燃料棒 (燃料芯块) 的直径，则因为铀装载量增加，所以通过取出燃烧度 (取り出し燃烧度) 降低，存在反应度增加的区域。

在本申请人提出的燃料集合体的设计方法中，在用于使燃料经济性

(中子倍增率)提高的燃料棒(燃料芯块)达到最优化时,在将从燃料集合体中取出的热量设为恒定的条件的基础上,使该燃料棒的直径或燃料芯块的直径发生变化,从而 H/U 比发生变化时,考虑由于燃料的重量发生变动导致的燃烧度的变化,对中子倍增率进行评价。由此,在燃料棒间距一定的条件下,如果燃料棒或燃料芯块的直径发生变化,则因为对中子倍增率进行评价的燃烧度发生变化,所以 H/U 比对中子倍增率的曲线发生错位。例如,如果使燃料棒及燃料芯块粗径化,则在同一取出热量下,因为燃烧度降低,所以中子倍增率变大。即,得到比使燃料棒及燃料芯块的直径发生变化前的 H/U 比对中子倍增率的曲线更大的值。其结果可知,在从燃料集合体取出的热量一定的条件下,相比于以往设计点将燃料棒及燃料芯块在某范围粗径化时,存在中子倍增率增加的区域。

如果详细地说明,压水型原子反应堆的反应堆芯能够基本由单一种(浓缩度)的燃料构成,根据该燃料的反应度特性能够推定与反应堆芯寿命有关的特性。为此的基本参数为“分批燃烧度”,其赋予“由该燃料构成的反应堆芯的循环末期的所有燃料集合体的平均燃烧度”,且定义为在循环末期假定的硼素浓度残量、输出水平下,能够正好维持临界的燃烧度。这是因为如果假定的反应堆芯的大小(燃料集合体的体数)发生变化,则中子的泄漏发生变化,所以受到若干影响,但基本上是“燃料特性”量,而不是个别反应堆芯的特性。如果构成反应堆芯的燃料集合体的浓缩度升高,则分批燃烧度提高,例如,如果是 4.8wt% 17×17 型燃料,则分批燃烧度约在 34GWd/t 前后。并且,压水型原子反应堆的反应堆芯寿命不妨认为是在构成反应堆芯的燃料整体的平均燃烧度到达该分批燃烧度的时刻即终止,几乎没有影响。因而,一般地,由分批燃烧度高的燃料构成的反应堆芯的寿命变长。或者,通过使用分批燃烧度大的燃料,能够减少用于维持同一反应堆芯寿命的新燃料替换体个数。

如果将上述的分批燃烧度设为 B (MWd/t), 替换批数(反应堆芯内的燃料集合体的区域数)设为 n, 可确保的循环燃烧度(反应堆芯寿命)设为 θ (MWd/t), 则存在以下的关系。

$$B = (n+1) / 2 \cdot \theta$$

如果将该数学式变形,则得到

$$n=2B/\theta - 1。$$

在该上述数学式中，燃料的浓缩度或铀装载量、及反应堆芯的输出等级等并未直接表示。这些作为分批燃烧度 B 或循环燃烧度（反应堆芯寿命） θ 的变化进行考虑。从上述数学式可知，即使改变燃料设计，分批燃烧度 B 降低，如果能够使循环燃烧度（反应堆芯寿命） θ 降低到超过分批燃烧度 B 的相对降低量，则替换批数 n 仍增加。该替换批数 n 的增加与替换燃料体个数的减少等价，并在相同循环长度的情况下，能够实现更有利的燃料运用，能够提高经济性。

如图 7 所示，在燃料棒 51，具有直径 D_p 的燃料芯块 61 以带有规定的间隙 G 的方式被填充在燃料被覆管 62 内，该燃料被覆管 62 以规定的厚度 T 设定为外径 D_r 。图 8 是表示中子倍增率（相对值）相对于燃料集合体的燃烧度的图表，并表示使燃料芯块 61 的直径 D_p 在 8.19mm~11.00mm 之间变化时的中子倍增率的变化程度。而且，因为以上述的以往的燃料集合体的设计方法设定的燃料芯块 61 的直径 D_p 为 8.19mm，且 4.8wt% 17×17 型燃料的分批燃烧度 B 为 34200MWd/t，所以将燃料芯块 61 的直径 $D_p=8.19$ mm，将集合体燃烧度 $B=34200$ MWd/t 时的中子倍增率 k_∞ （相对值）设定为 1.0。此外，即使使燃料芯块 61 的直径 D_p 变化，认为与燃料被覆管 62 之间的间隙 G 和燃料被覆管 62 的厚度 T 不发生变化。

因而，如图 8 的图表所示，因燃烧期间（集合体燃烧度）的增加，中子倍增率 k_∞ （反应度）降低，此外，如果使燃料芯块的直径 D_p 增加，则因为减速材料的量减少，所以中子倍增率降低。分批燃烧度是提供用于将反应堆芯正好维持在临界所需要的反应度（中子倍增率）的点，即使增大芯块径，如果将评价 k_∞ 的燃烧度固定在芯块径为 8.19mm 时的分批燃烧度（ $B=34200$ MWd/t），则因为燃料芯块的粗径化，中子倍增率单调降低（图 8 的图表的 \circ 标记）。在此情况下，即使将芯块径粗径化，也使循环长度延长，以使燃烧度变成相同。另一方面，考虑将循环长度固定的情况下，因伴随燃料芯块的粗径化的铀重量的增加，循环燃烧度降低（图 8 的图表的 \diamond 标记）。即，在将燃料芯块粗径化、并在燃料棒全长上将其直径 D_p 从 D_0 变更为 D_1 的情况下，因为提供相同的循环长度（天数）的循环燃烧度 θ_0 与 θ_1 中以下的关系成立，所以因燃料芯块的粗径化，循环燃烧度降低。

$$\theta_1 / \theta_0 = (D_0 / D_1)^2$$

而且，如上所述，根据反应堆芯热输出、运转期间、燃料集合体的最高燃烧度来决定燃料装载重量，并考虑输出峰值系数来决定燃料棒的根数、长度，并由燃料装载重量与根数来决定燃料棒的直径，并考虑燃料棒的特性来决定燃料被覆管的内径及外径，芯块的直径是根据燃料被覆管的内径及外径、以及基于铀和轻水的比率的减速率来进行设定的，该燃料芯块的直径 D_0 以该方法进行设定，此外，与芯块的直径 D_0 对应的循环燃烧度是 θ_0 。

此外，图 9 是表示中子倍增率（相对值）相对于燃料芯块的直径相对的图表。从图 8 的图表可知，在芯块直径 $D_p = D_0 = 8.19$ 时，从中子倍增率 k_∞ （相对值）为 1.0 的燃烧度（图 8 中的相对于芯块直径 $D_p = D_0$ 描绘的曲线，从图表左上方开始降低，与中子倍增率 k_∞ （相对值）=1.0 的线相交的燃烧度，即与芯块直径 D_p 对应的分批燃烧度）开始，沿伴随芯块直径 D_p 的增加的循环燃烧度的降低比例，求出中子倍增率 k_∞ （相对值）。该中子倍增率 k_∞ （相对值）超过 1.0 意味着在增加芯块直径 D_p 时， k_∞ （相对值）到达 1.0 的燃烧度（图 8 的按各芯块直径描绘的曲线从图表左上方开始降低，与中子倍增率 k_∞ （相对值）=1.0 的线相交的燃烧度，即，与各芯块直径 D_p 对应的分批燃烧度）高于以循环燃烧度的降低比例减少的燃烧度，分批燃烧度的降低比例仅意味着小于循环燃烧度的降低比例。

因此，可以认为，该中子倍增率（相对值）增加等价于进行燃料芯块的粗径化时的分批燃烧度 B 与循环燃烧度 θ 的比 (B/θ) 增加。因而，从上述数学式可知，与燃料芯块的直径的增加相对的循环燃烧度的降低比例带有逐渐变得平缓的倾向。另一方面，图 10 是以图 8 的图表为基础，表示循环燃烧度及分批燃烧度相对于芯块直径的降低比例的图表。分批燃烧度的变化，如该图 10 所示，可知相对于燃料芯块的直径的增加，其变化量带有逐渐增加的倾向。这是因为如果燃料芯块的直径的增加量增加，则加速了减速材料量的减少，对反应度造成的影响带有增加的倾向。如果比较两者，可知燃料芯块的粗径化的程度在如图 10 所示的增益界限直径以下的区域、即在粗径化增益区域内，循环燃烧度的降低比例大于分批燃烧度的降低比例，即，中子倍增率为 1.0 以上。

图 11 是表示中子倍增率（相对值）相对于燃料芯块的图表，特别是为表示燃料芯块的直径的最佳区域，将图 9 的图表的一部进行放大后的图表。如该图 11 的图表所示，燃料芯块的直径 D_p 在大于 8.19mm、且在 8.62mm 以下的区域 A_{17} 中，分批燃烧度 B 与循环燃烧度 θ 分别降低，但其比 (B/θ) 增加。即，中子倍增率的相对值超过 1.0，在该区域 A_{17} ，能够得出通过燃料芯块的粗径化能够降低替换燃料体个数的优点。

即，在压水型原子反应堆 12 中，燃料棒 51 以 17×17 的正方格子状、燃料集合体间距 P_1 为 215mm、燃料棒间距 P_2 为 12.6mm 而排列的燃料集合体 40 中，通过将燃料芯块 61 的直径 D_p 设定为大于 8.19mm、且在 8.62mm 以下，从而能够将该燃料芯块 61 的直径最佳化，相比于以往的燃料集合体使中子倍增率提高，能够提高反应度。在此情况下，将燃料芯块 61 的直径 D_p 设定在 $8.19 < D_p \leq 8.62\text{mm}$ ，但最佳值是 $D_p = 8.40\text{mm}$ 。

而且，在 17×17 形式的燃料集合体中，在设计上，将燃料集合体间距 P_1 设为 215mm，将燃料棒间距 P_2 设为 12.6mm，但需要对燃料集合体间距 P_1 加入 $\pm 1\text{mm}$ 左右的尺寸公差，对燃料棒间距 P_2 加入 $\pm 0.1\text{mm}$ 左右的尺寸公差。此外，需要将燃料芯块 61 与燃料被覆管 62 的间隙 G 设在 0.08mm 左右，并确保锆合金制的燃料被覆管 62 的厚度在 0.57mm 左右。此外，将燃料芯块 61 的直径 D_p 的下限值设定在大于 8.19mm，但考虑到尺寸公差，期望设在 8.25mm 以上。

如此，根据实施例 1 的原子反应堆，将对铀氧化物进行烧固后的燃料芯块 61 填充在锆合金制的燃料被覆管 62 中形成燃料棒 51，并对多个该燃料棒 51 格子状地进行集束而构成燃料集合体 40，在将从燃料集合体 40 产生的热量设为一定的情况下，通过增加燃料芯块 61 的外径，装载于燃料集合体 40 的铀的重量增加，并求出相伴于此的燃烧度的降低导致的反应度的增加量超过因为该燃料芯块 61 外径的增加引起的轻水（减速材料）量的减少所导致的减速不足而产生的反应度的下降量的区域（粗径化增益区域） A_{17} ，并在该中子倍增率上升的区域 A_{17} 内设定燃料芯块 61 的直径。

如果增大燃料芯块 61 的外径，则作为减速材料的轻水的量减少，由此导致减速恶化，从而反应度降低，但因为铀装载量增加，燃烧度降低，所以反应度增加，在此两者的关系中，存在与燃料芯块 61 外径的增加相

伴的燃料装载量增加所引起的反应度的增加量超过由于减速材料量的减少导致的减速不足所造成的反应度的下降量的区域 A_{17} ，通过在该区域 A_{17} 内设定燃料芯块 61 的外径，燃料芯块 61 的直径被最佳化，并能够使反应度增加，从而可以延长反应堆芯寿命。

在此情况下，反应度上升的区域 A_{17} 是即使因燃料芯块 61 的外径增加导致分批燃烧度降低，也超过其相对的降低部分而使循环燃烧度降低的区域，且循环燃烧度的降低部分超过由于该燃料芯块 61 的直径的增加导致的分批燃烧度的降低部分的区域 A_{17} 是使燃料棒 51 的替换根数减少的区域，并能够提高经济性。

具体地，在压水型原子反应堆 12 中，燃料棒 51 以 17×17 的格子状、燃料集合体间距 P_1 为 215mm、燃料棒间距 P_2 为 12.6mm 而排列的燃料集合体 40 中，将燃料芯块 61 的直径 D_p 设定为大于 8.19mm，且在 8.62mm 以下。从而，能够将该燃料芯块 61 的直径最佳化，相比于以往的燃料集合体使中子倍增率提高，且能够提高反应度。

实施例 2

图 12 是表示中子倍增率相对于本发明的实施例 2 所述的压水型原子反应堆中的 15×15 型燃料集合体的燃烧度的图表，图 13 是表示中子倍增率相对于燃料芯块直径的图表，图 14 是表示燃料芯块直径的最佳区域的图表。而且，具有与上述实施例中说明的相同的功能的部件标注同一标记，并省略重复的说明。

实施例 2 的压水型原子反应堆的燃料集合体是燃料棒以 15×15 的格子状、燃料集合体间距 P_1 为 215mm、燃料棒间距 P_2 为 14.3mm 排列而成。并且，在本实施例中，与上述实施例 1 同样地，在将燃料芯块粗径化的特定的区域内，循环燃烧度的降低比例大于燃料集合体的分批燃烧度的降低比例，即中子倍增率提高，并在该区域内对燃料集合体进行设计。

图 12 是表示中子倍增率（相对值）相对于 15×15 形式的燃料集合体的燃烧度的图表，并表示使燃料芯块的直径 D_p 在 9.29mm~11.29mm 之间变化时的中子倍增率的变化程度。因为以上述的以往的燃料集合体的设计方法设定的燃料芯块的直径 D_p 为 9.29mm，且 4.8wt% 15×15 型燃料的分批燃烧度 $B=33100\text{MWd/t}$ ，所以将燃料芯块的直径 $D_p=9.29\text{mm}$ 、集合体

燃烧度 B 为 33100MWd/t 时的中子倍增率 k_{∞} (相对值) 设定为 1.0。此外, 即使使燃料芯块的直径 D_p 变化, 认为与燃料被覆管之间的间隙 G 和燃料被覆管的厚度 T 不发生变化。

因而, 如图 12 的图表所示, 因燃烧期间 (集合体燃烧度) 的增加, 中子倍增率 k_{∞} (反应度) 降低, 此外, 如果使燃料芯块的直径 D_p 增加, 则因为减速材料量减少, 所以中子倍增率降低。分批燃烧度是提供用于将反应堆芯正好维持在临界所需要的反应度 (中子倍增率) 的点, 且即使使芯块直径变粗, 如果将评价 k_{∞} 的燃烧度固定在芯块直径为 9.29mm 时的分批燃烧度 ($B=33100\text{MWd/t}$), 则因燃料芯块的粗径化, 中子倍增率单调降低 (图 12 的图表的 \circ 标记)。在此情况下, 即使使芯块直径粗径化, 也使循环长度延长, 以使燃烧度相同。另一方面, 在考虑将循环长度固定的情况下, 因伴随燃料芯块的粗径化的铀重量的增加而导致循环燃烧度降低 (图 12 的图表的 \diamond 标记)。即, 在将燃料芯块粗径化、并在燃料棒全长上将其直径 D_p 从 D_0 变更为 D_1 的情况下, 如上述实施例 1 中说明的那样, 由于燃料芯块的粗径化, 导致循环燃烧度降低。

此外, 图 13 是表示中子倍增率 (相对值) 相对于燃料芯块的图表, 可以认为, 该中子倍增率 (相对值) 增加等价于进行燃料芯块的粗径化时的分批燃烧度 B 与循环燃烧度 θ 的比 (B/θ) 增加。因而如上述实施例 1 中的说明可知, 循环燃烧度相对于燃料芯块直径的增加的降低比例带有逐渐变得平缓的倾向。另一方面可知, 与上述实施例 1 同样, 分批燃烧度的变化相对于燃料芯块的直径的增加, 带有其变化量逐渐增加的倾向。这是因为如果燃料芯块的直径的增加量增加, 则加速了减速材料量的减少, 对反应度造成的影响带有增加的倾向。如果比较两者, 可知在燃料芯块的粗径化的程度微小的区域内, 循环燃烧度的降低比例大于分批燃烧度的降低比例, 即, 中子倍增率为 1.0 以上。

图 14 是表示中子倍增率 (相对值) 相对于燃料芯块的图表, 特别是为表示燃料芯块的直径的最佳区域而将图 13 的图表进行放大后的图表。如图 14 的图表所示, 燃料芯块的直径 D_p 在大于 9.29mm, 且在 10.11mm 以下的区域 A_{15} 中, 分批燃烧度 B 与循环燃烧度 θ 分别降低, 但其比 (B/θ) 增加。即, 中子倍增率的相对值超过 1.0, 能够得出在该区域 A_{15} 内, 通过

燃料芯块的粗径化可降低替换燃料体个数的优点。

即，在压水型原子反应堆中，燃料棒以 15×15 的正方格子形、且燃料集合体间距 P_1 为 215mm、燃料棒间距 P_2 为 14.3mm 排列的燃料集合体中，通过将燃料芯块的直径 D_p 设定为大于 9.29mm，且在 10.11mm 以下，从而能够将该燃料芯块的直径最佳化，相比于以往的燃料集合体使中子倍增率提高，且能够增加反应度。在此情况下，将燃料芯块的直径 D_p 设定在 $9.29 < D_p \leq 10.11$ mm，但最佳值是 $D_p = 9.69$ mm。

而且，在 15×15 型的燃料集合体中，在设计上，将燃料集合体间距 P_1 设为 215mm，将燃料棒间距 P_2 设为 14.3mm，但需要对燃料集合体间距 P_1 加入 ± 1 mm 左右的尺寸公差，对燃料棒间距 P_2 加入 ± 0.1 mm 左右的尺寸公差。此外，需要将燃料芯块与燃料被覆管的间隙 G 设在 0.09mm 左右，并确保锆合金制的燃料被覆管的厚度在 0.62mm 左右。此外，将燃料芯块的直径 D_p 的下限值设定在大于 9.29mm，但考虑到尺寸公差，期望设在 9.35mm 以上。

如此，根据实施例 2 的原子反应堆，在压水型原子反应堆中，燃料棒以 15×15 的格子状、且燃料集合体间距 P_1 为 215mm、燃料棒间距 P_2 为 14.3mm 排列的燃料集合体中，在将来自燃料集合体的产生热量设为一定的情况下，通过增加燃料芯块的外径，装载于燃料集合体的铀的重量增加，与此相伴的燃烧度的降低导致的反应度的增加量超过由于该燃料芯块外径的增加引起的轻水（减速材料）量的减少所导致的减速不足而产生的反应度的不足部分的区域（粗径化增益区域）设为 A_{15} ，并将燃料芯块的直径 D_p 设定在大于 9.29mm 且 10.11mm 以下。从而能够将该燃料芯块的直径最佳化，相比于以往的燃料集合体能够使中子倍增率增加，并可以使反应度增加。

实施例 3

图 15 是表示中子倍增率相对于本发明的实施例 3 所述的压水型原子反应堆中的 14×14 型燃料集合体的燃烧度的图表，图 16 是表示中子倍增率相对于燃料芯块直径的图表，图 17 是表示燃料芯块直径的最佳区域的图表。而且，具有与上述实施例中说明的相同的功能的部件标注同一标记，并省略重复的说明。

实施例 3 的压水型原子反应堆的燃料集合体是燃料棒以 14×14 的正方形格子状、且燃料集合体间距 P_1 为 198mm、燃料棒间距 P_2 为 14.1mm 排列而成。并且，在本实施例中，与上述实施例 1 同样地，在将燃料芯块粗径化的特定的区域内，循环燃烧度的降低比例大于燃料集合体的分批燃烧度的降低比例，即中子倍增率提高，在该区域对燃料集合体进行设计。

图 15 是表示中子倍增率（相对值）相对于 14×14 形式的燃料集合体的燃烧度的图表，并表示使燃料芯块的直径 D_p 在 9.29mm~11.29mm 之间变化时的中子倍增率的变化程度。因为以上述的以往的燃料集合体的设计方法设定的燃料芯块的直径 D_p 为 9.29mm，且 4.8wt% 14×14 型燃料的分批燃烧度 B 为 32000MWd/t，所以将燃料芯块的直径 $D_p=9.29$ mm、集合体燃烧度 $B=32000$ MWd/t 时的中子倍增率 k_{∞} （相对值）设定为 1.0。此外，即使使燃料芯块的直径 D_p 变化，认为与燃料被覆管之间的间隙 G 和燃料被覆管的厚度 T 不发生变化。

因而，如图 15 的图表所示，因燃烧期间（集合体燃烧度）的增加，中子倍增率 k_{∞} （反应度）降低，此外，如果使燃料芯块的直径 D_p 增加，则因为减速材料量减少，所以中子倍增率降低。分批燃烧度是提供用于将反应堆芯正好维持在临界所需要的反应度（中子倍增率）的点，且即使使芯块直径变粗，如果将评价 k_{∞} 的燃烧度固定在芯块直径为 9.29mm 时的分批燃烧度（ $B=32000$ MWd/t），则因燃料芯块的粗径化，中子倍增率单调降低（图 15 的图表的 \circ 标记）。在此情况下，即使使芯块直径粗径化，也使循环长度延长，以使燃烧度相同。另一方面，在考虑将循环长度固定的情况下，伴随燃料芯块的粗径化的铀重量的增加导致循环燃烧度降低（图 15 的图表的 \diamond 标记）。即，将燃料芯块粗径化，并在燃料棒全长上将其直径 D_p 从 D_0 变更为 D_1 的情况下，与上述实施例 1 同样，由于燃料芯块的粗径化导致循环燃烧度降低。

此外，图 16 是表示中子倍增率（相对值）相对于燃料芯块的直径的图表，可以认为，该中子倍增率（相对值）增加等价于进行燃料芯块的粗径化时的分批燃烧度 B 与循环燃烧度 θ 的比（ B/θ ）增加。因而与上述实施例 1 同样，循环燃烧度相对于燃料芯块直径的增加的降低比例带有逐渐变得平缓的倾向。另一方面可知，与上述实施例 1 同样，分批燃烧度的变

化相对于燃料芯块的直径的增加，带有其变化量逐渐增加的倾向。这是因为如果燃料芯块的直径的增加量增加，则加速了减速材料量的减少，对反应度造成的影响带有增加的倾向。如果比较两者，可知在燃料芯块的粗径化的程度微小的区域内，循环燃烧度的降低比例大于分批燃烧度的降低比例，即，中子倍增率为 1.0 以上。

图 17 是表示中子倍增率（相对值）相对于燃料芯块的直径的图表，特别是为表示燃料芯块的直径的最佳区域而将图 16 的图表进行放大后的图表。如图 17 的图表所示，在燃料芯块的直径 D_p 大于 9.29mm、且在 9.64mm 以下的区域 A_{14} 中，分批燃烧度 B 与循环燃烧度 θ 分别降低，但其比 (B/θ) 增加。即，中子倍增率的相对值超过 1.0，能够得出在该区域 A_{14} 内通过燃料芯块的粗径化可降低替换燃料体个数的优点。

即，在压水型原子反应堆中，燃料棒以 14×14 的正方格子状、且燃料集合体间距 P_1 为 198mm、燃料棒间距 P_2 为 14.1mm 排列的燃料集合体中，通过将燃料芯块的直径 D_p 设定为大于 9.29mm、且在 9.64mm 以下，能够将该燃料芯块的直径最佳化，相比于以往的燃料集合体使中子倍增率提高，且能够增加反应度。在此情况下，将燃料芯块的直径 D_p 设定在 $9.29 < D_p \leq 9.64\text{mm}$ ，但最佳值是 $D_p=9.47\text{mm}$ 。

而且，在 14×14 型的燃料集合体中，在设计上，将燃料集合体间距 P_1 设为 198mm，将燃料棒间距 P_2 设为 14.1mm，但需要对燃料集合体间距 P_1 加入 $\pm 1\text{mm}$ 左右的尺寸公差，对燃料棒间距 P_2 加入 $\pm 0.1\text{mm}$ 左右的尺寸公差。此外，需要将燃料芯块与燃料被覆管的间隙 G 设在 0.09mm 左右，并确保锆合金制的燃料被覆管的厚度在 0.62mm 左右。此外，将燃料芯块的直径 D_1 的下限值设定在大于 9.29mm，但考虑到尺寸公差，期望设在 9.35mm 以上。

如此，根据实施例 3 的原子反应堆，在压水型原子反应堆中，燃料棒以 14×14 的正方格子状、且燃料集合体间距 P_1 为 198mm、燃料棒间距 P_2 为 14.1mm 而排列的燃料集合体中，在将来自燃料集合体的产生热量设为一定的情况下，通过增加燃料芯块的外径，装载于燃料集合体的铀的重量增加，与此相伴的燃烧度的降低导致的反应度的增加部分超过由于该燃料芯块的外径的增加引起的轻水（减速材料）量的减少所导致的减速不足

而产生的反应度的不足部分的区域（粗径化增益区域）设为 A_{14} ，并将燃料芯块的直径 D_p 设定在大于 9.29mm 且 9.64mm 以下。从而能够将该燃料芯块的直径最佳化，相比于以往的燃料集合体能够使中子倍增率增加，并使反应度增加。

工业实用性

本发明所述的压水型原子反应堆的燃料集合体及燃料集合体的设计方法通过增加燃料芯块 61 的外径，求得反应度提高的区域，实现燃料芯块的直径的最佳化，能够适用于任意种类的压水型原子反应堆的燃料集合体或其设计方法。

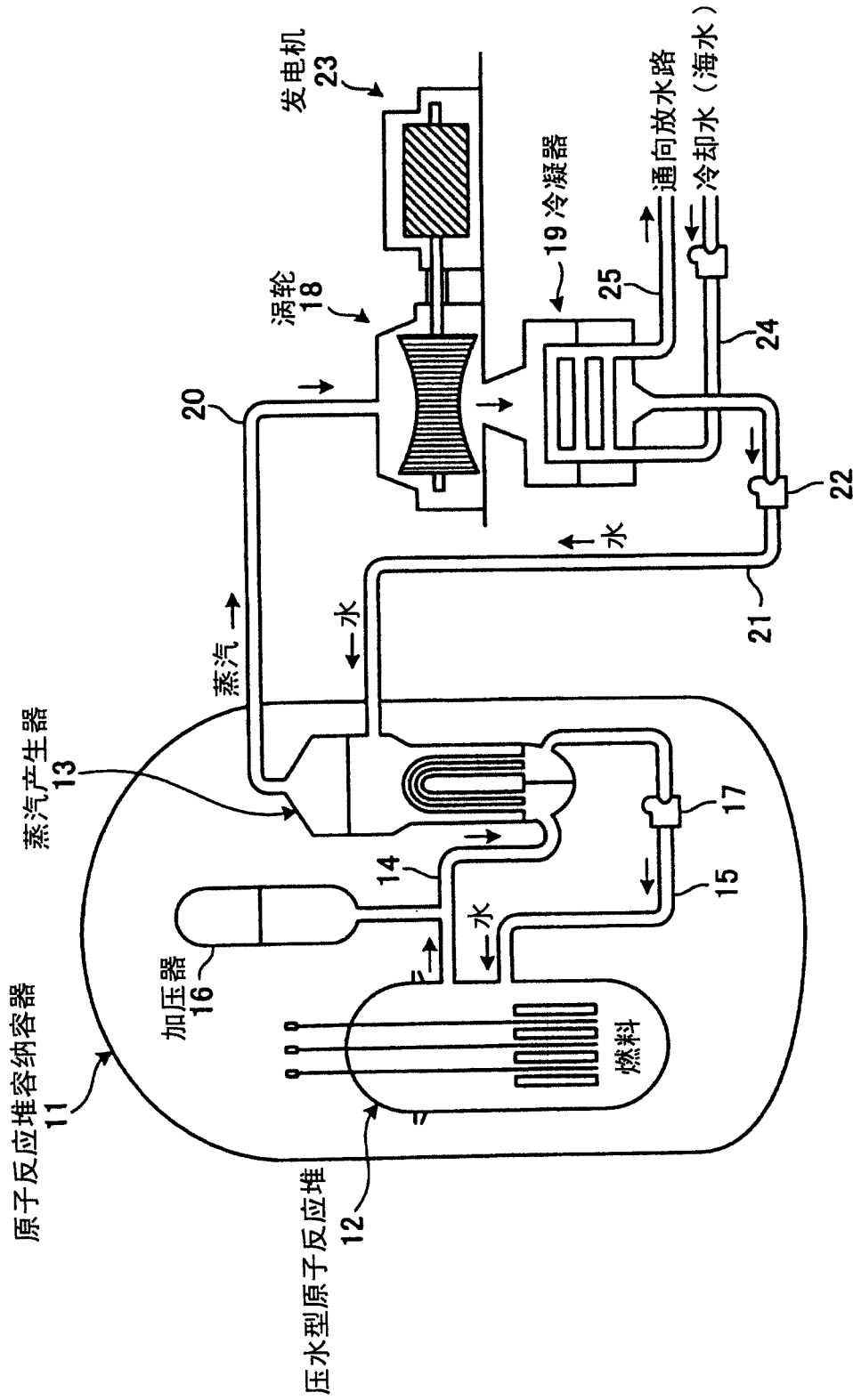


图 1

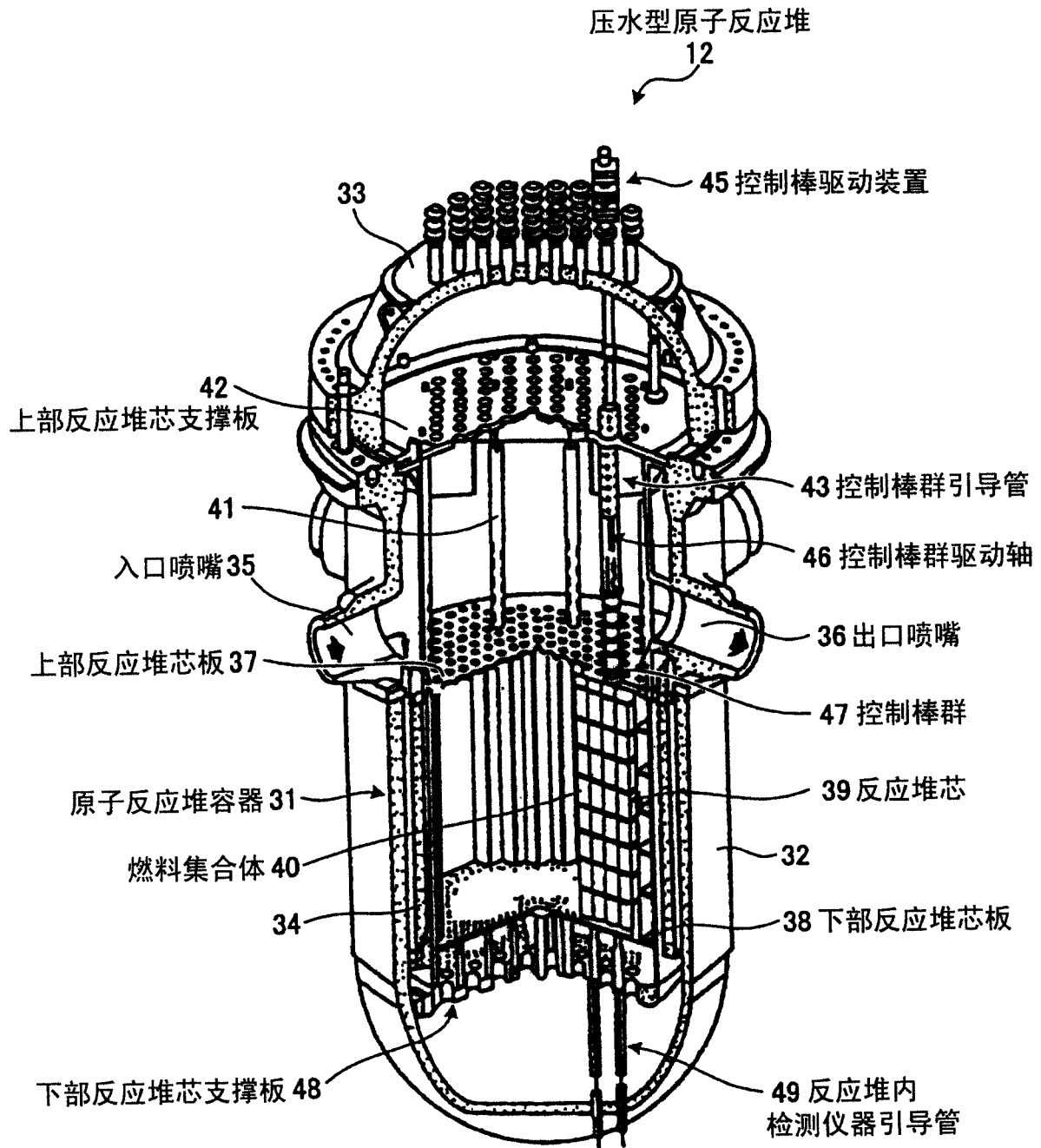


图 2

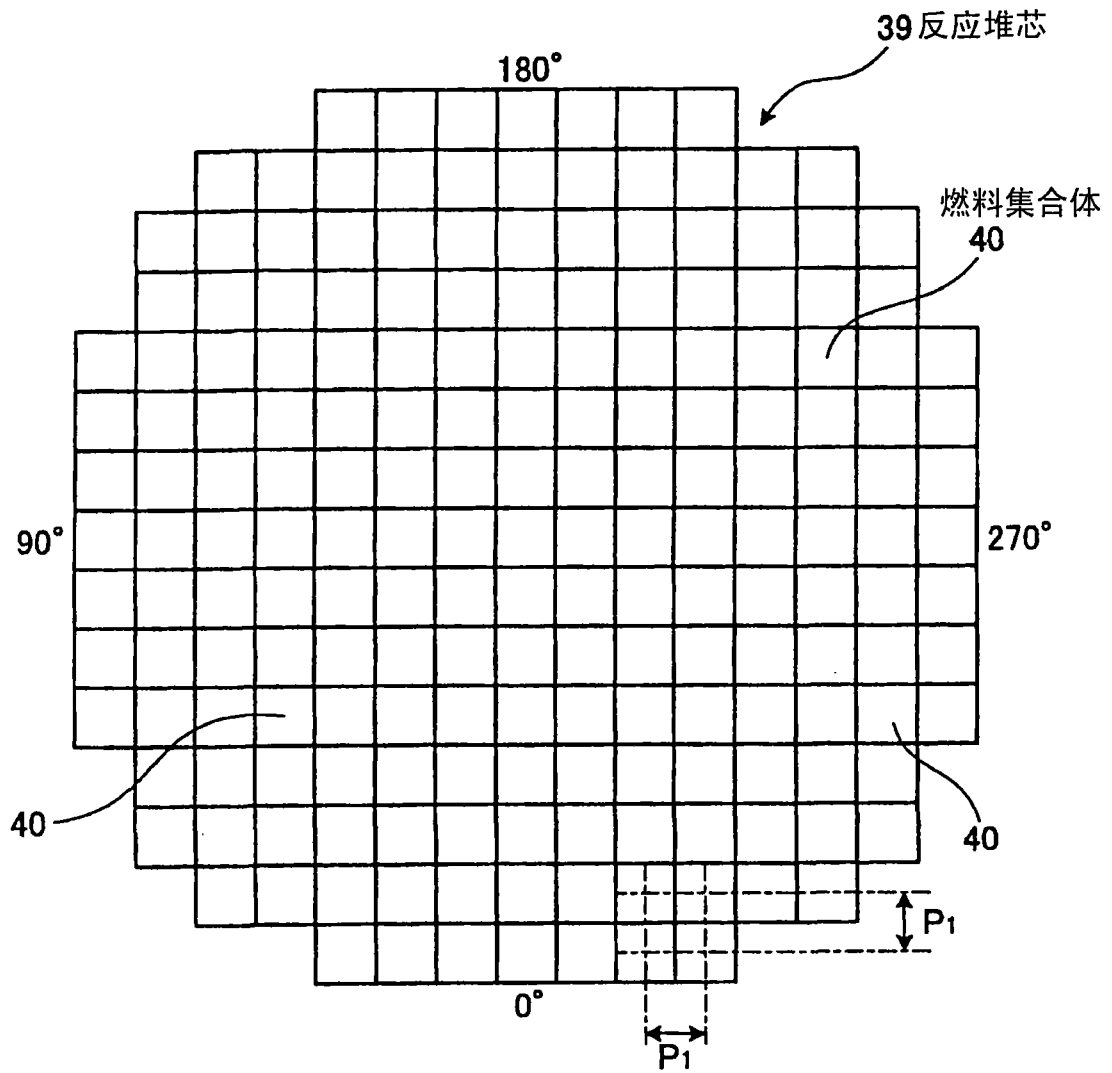


图 3

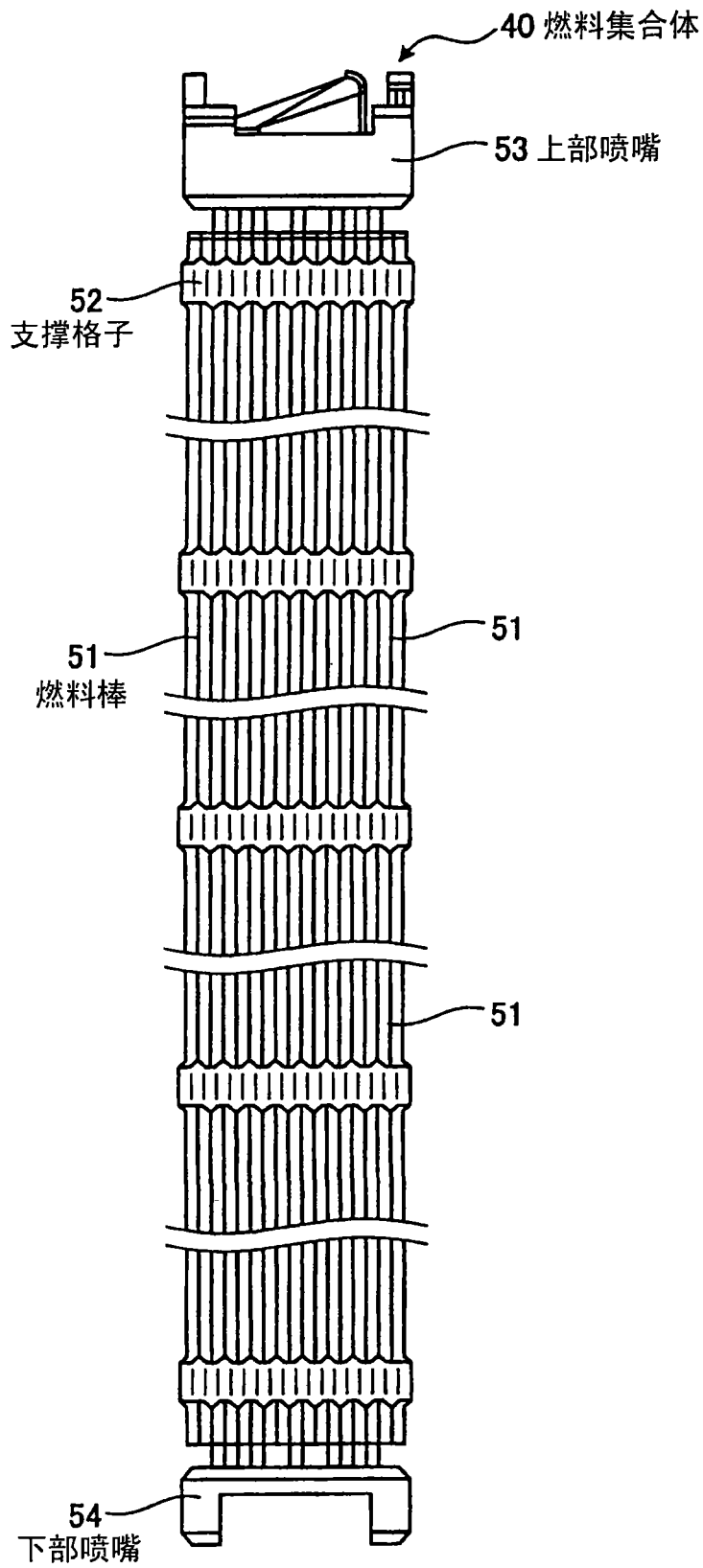


图 4

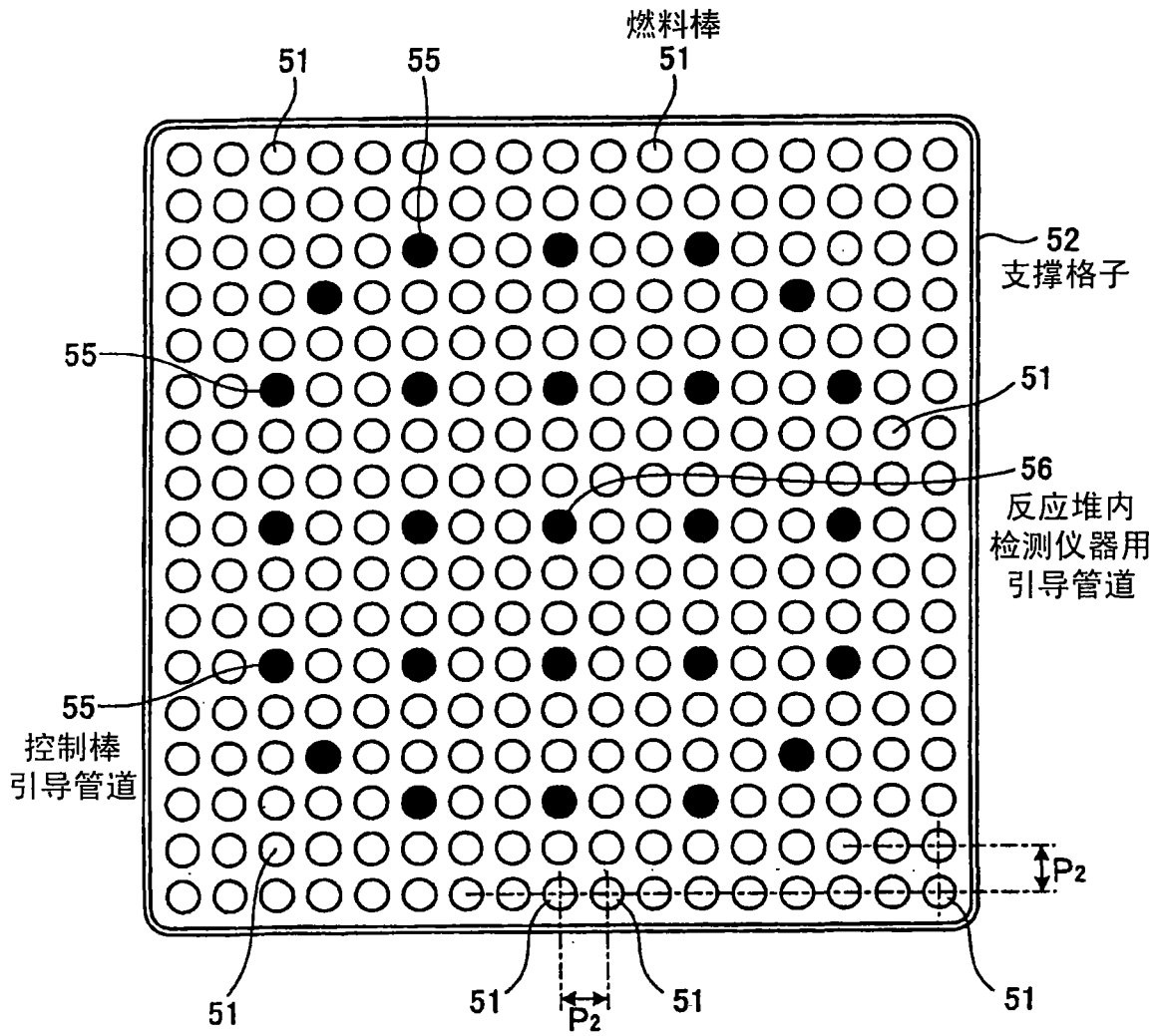


图 5

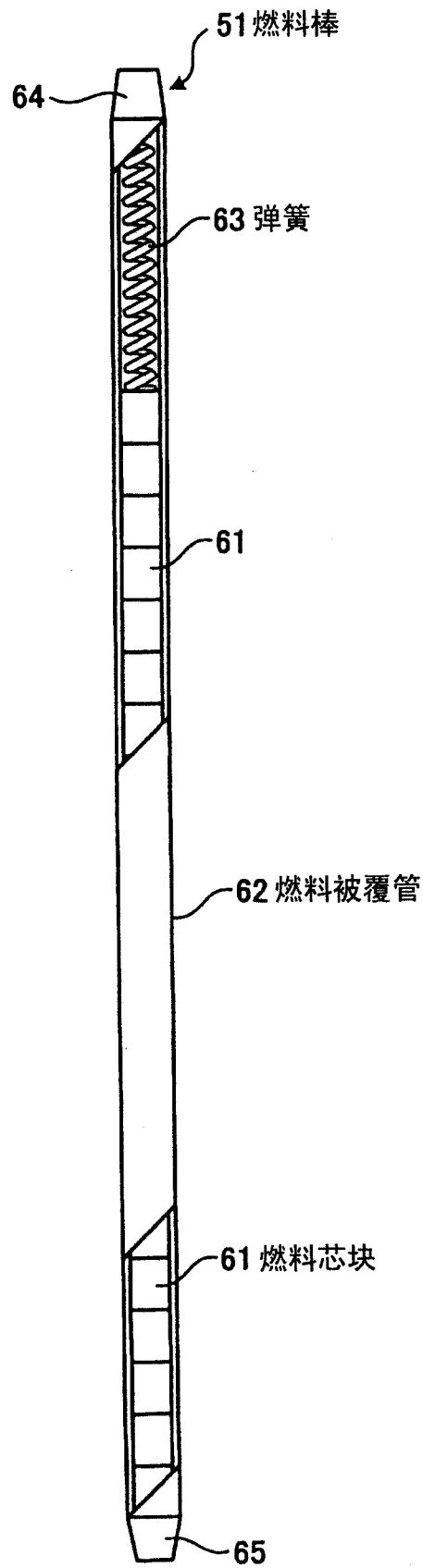


图 6

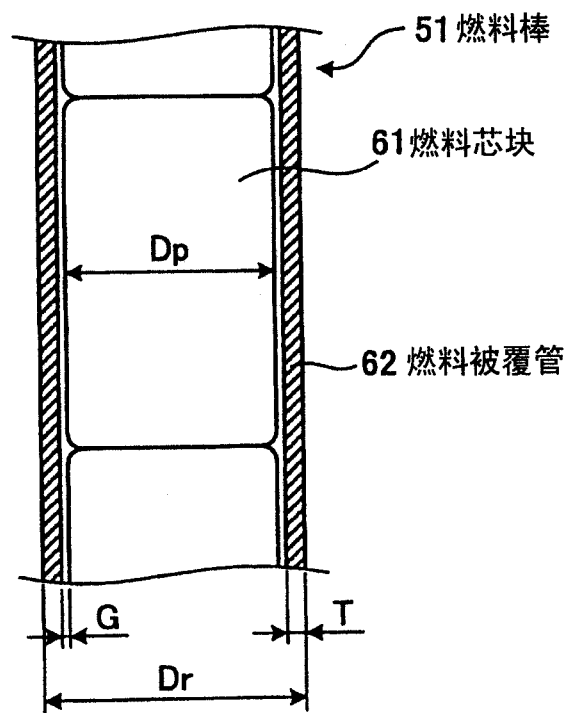


图 7

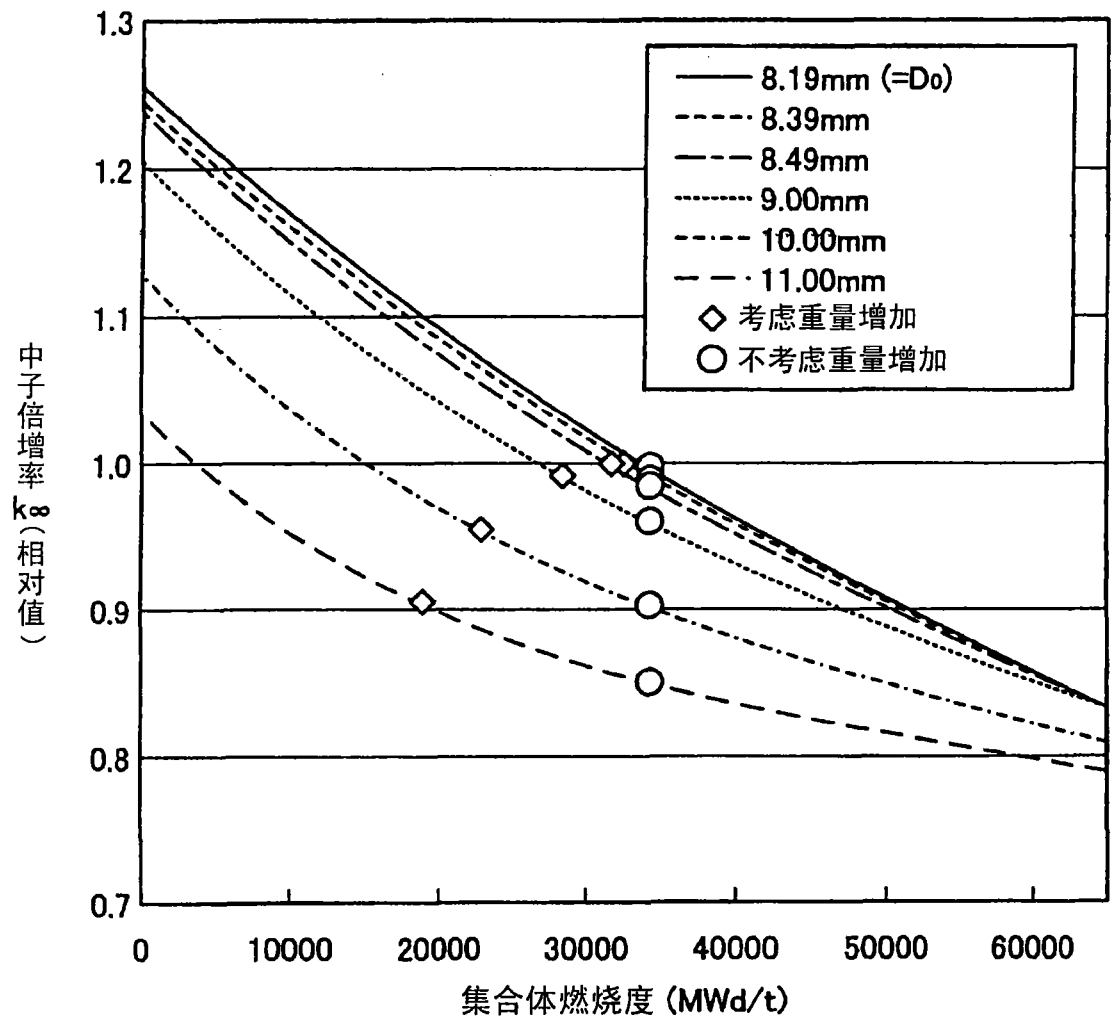


图 8

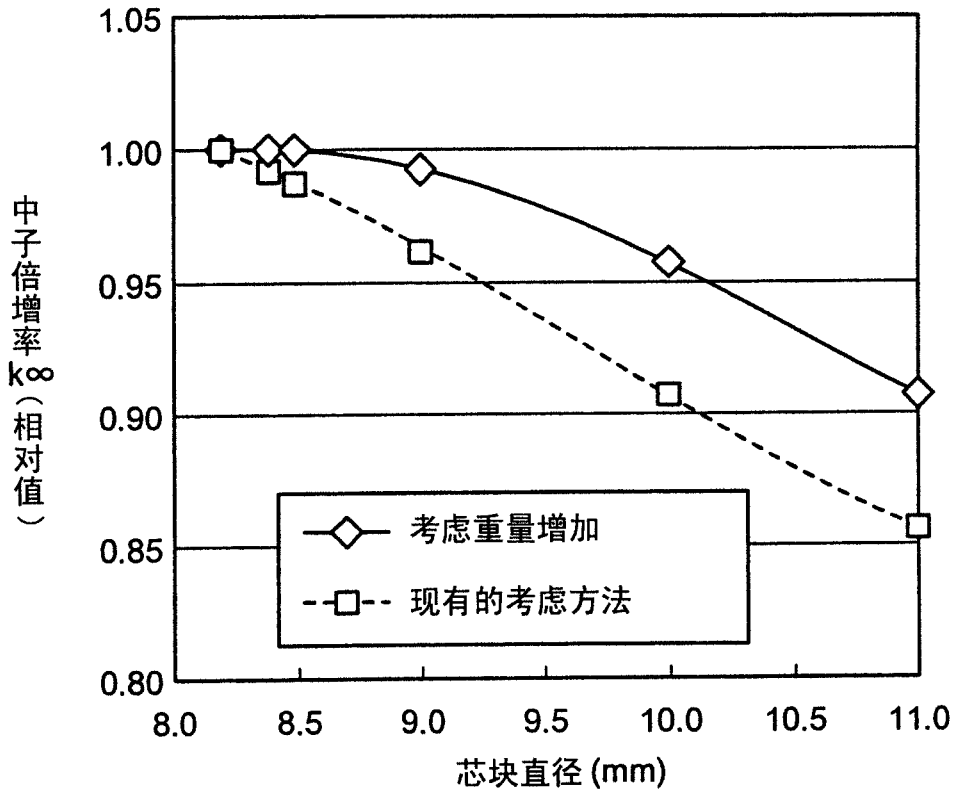


图 9

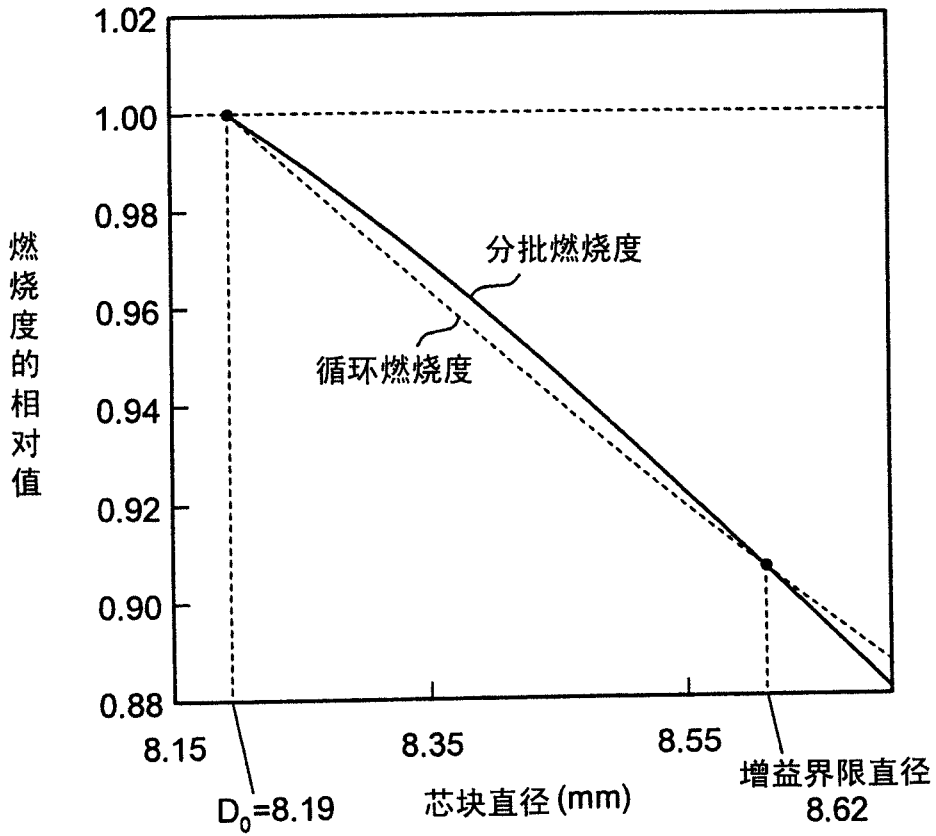


图 10

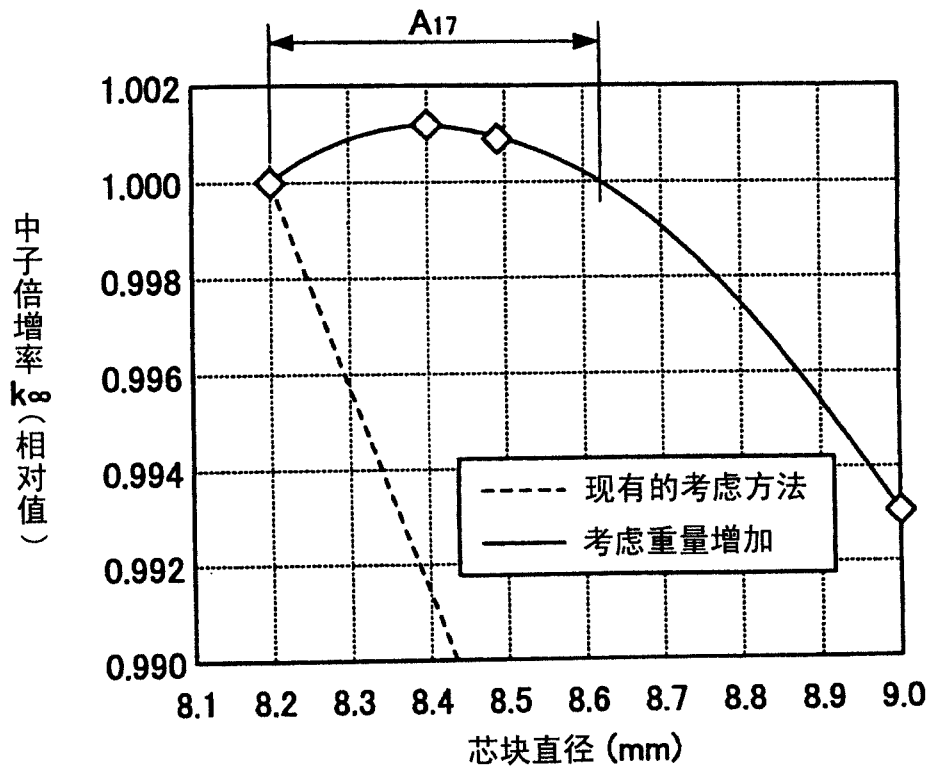


图 11

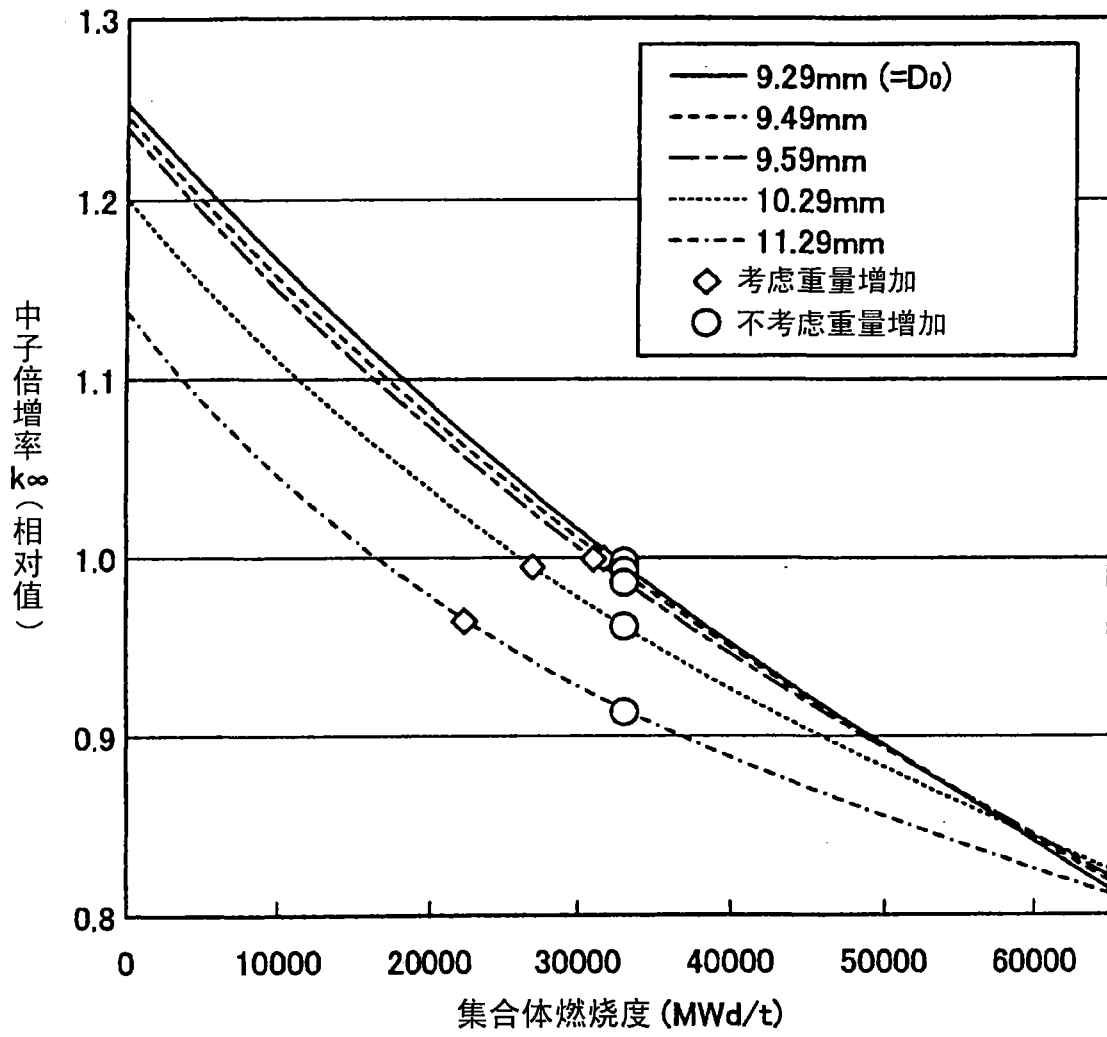


图 12

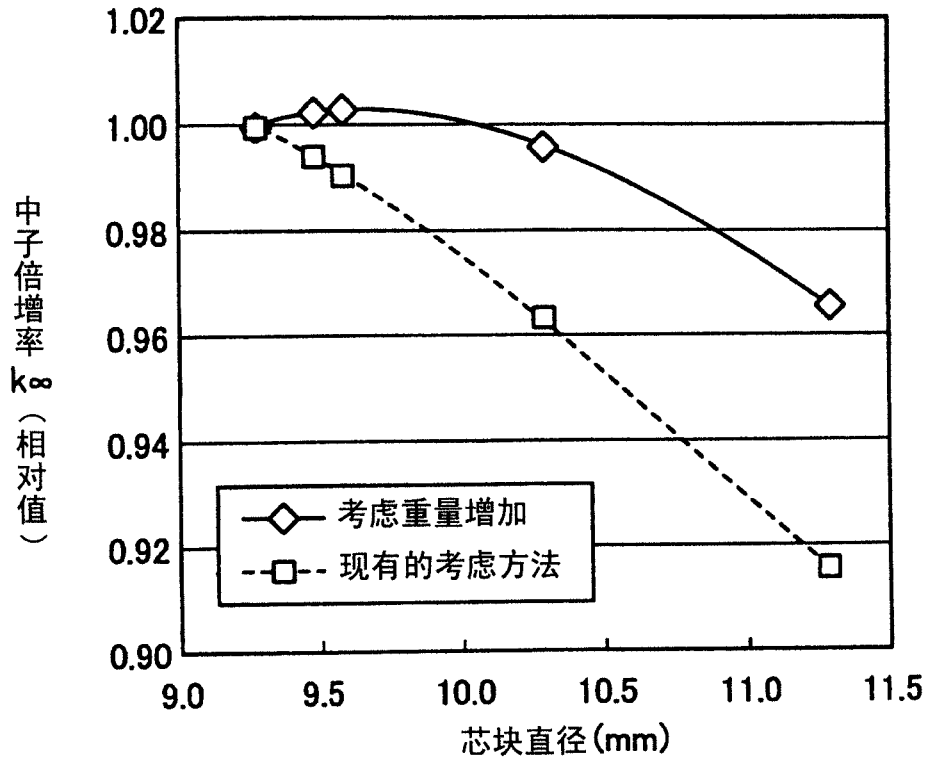


图 13

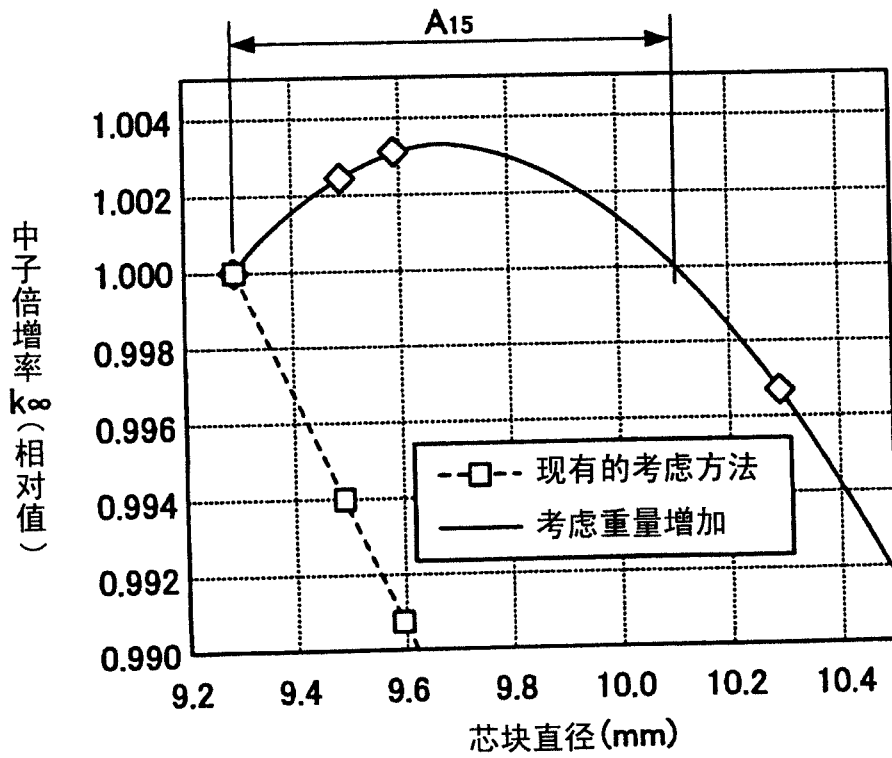


图 14

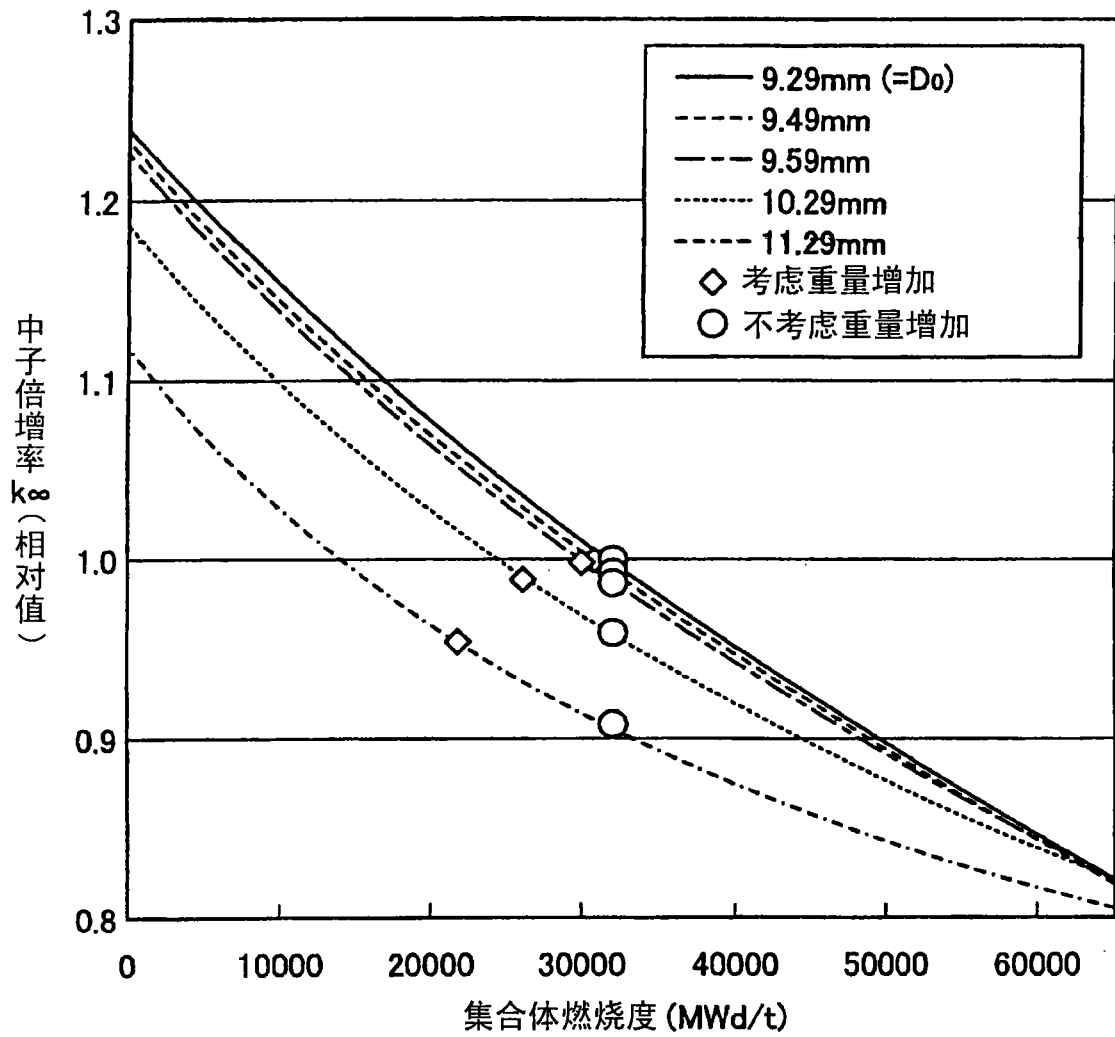


图 15

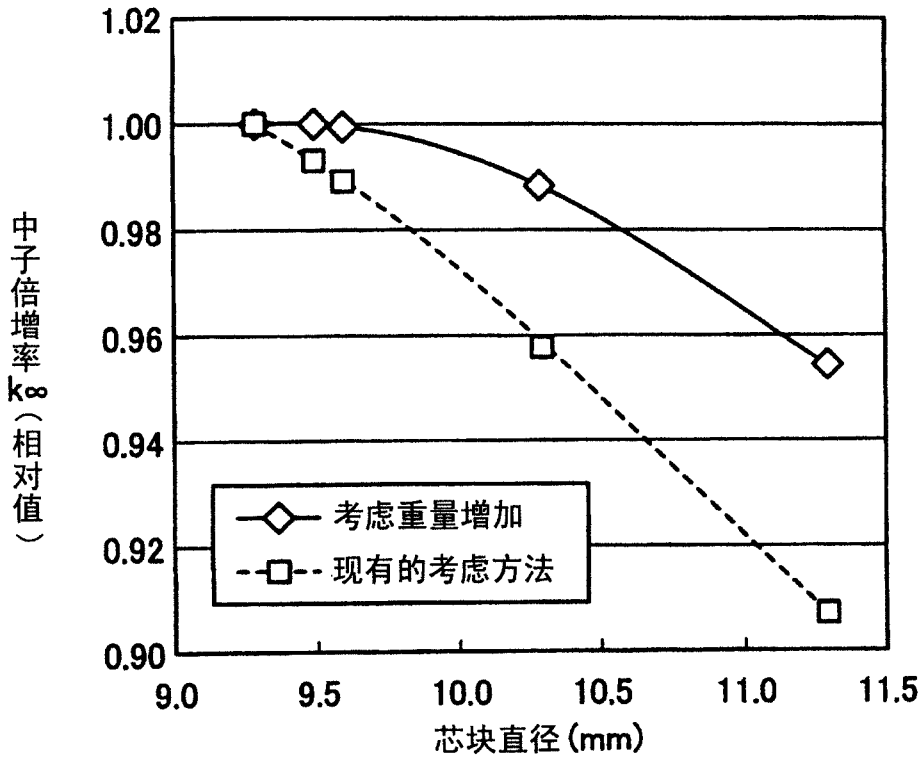


图 16

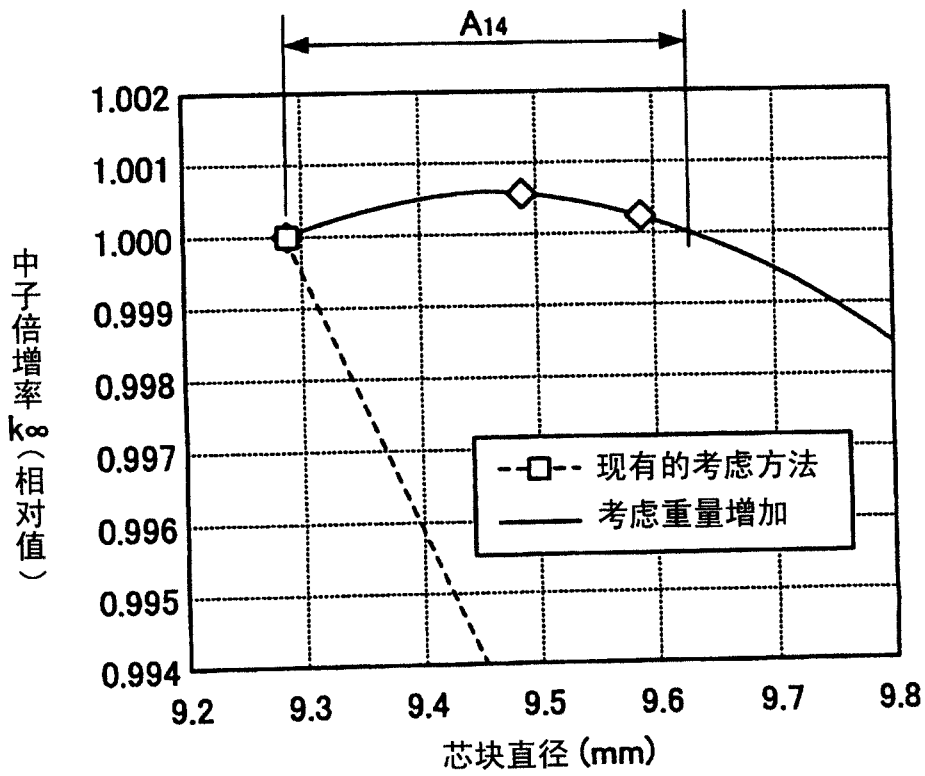


图 17