

【發明說明書】

【中文發明名稱】 核燃料丸、燃料棒及燃料總成

【英文發明名稱】 A Nuclear Fuel Pellet, a Fuel Rod, and a Fuel Assembly

【技術領域】

【0001】 本發明一般涉及用於核反應器中的核燃料的金屬陶質基質組成物，例如水反應器和快中子反應器(fast reactors)。更具體地說，本發明涉及一種用於核反應器的核燃料丸，其包含金屬基質和分散在金屬基質中的可裂材料的陶瓷燃料顆粒。本發明還涉及燃料棒，且涉及用於核反應器中的燃料總成。

【先前技術】

【0002】 已經提出非活性金屬系統(諸如Mo)作為將可裂材料容納在核燃料丸中的基質化合物。US 2015/0294747揭示一種製造金屬陶質金屬燃料基質燃料針的方法。燃料針可以包含用過核燃料、氧化鈦、氧化鈳的陶瓷顆粒，以及這些在來自原料的金屬基質中的組合。金屬基質可以包括鈾、鋳、超鈾、鈾、再製金屬燃料。

【發明內容】

【0003】 本發明的目的是提供一種用於金屬陶質燃料的新穎基質材料和一種新穎陶瓷-金屬雙相燃料。具體而言，本發明的目標是一種經改良的基質，其使得核燃料丸能夠滿足所謂的事故容錯燃料(ATF)的要求。

【0004】 這個目的藉由最初定義的核燃料丸來實現，其特徵在於金屬基質是由主要元素U、Zr、Nb和Ti以及可能的其餘元素所組成的合金，其中金屬基質中每個主要元素的濃度最多為50莫耳%。

【0005】 這樣包含四種主要元素並且可能還有少量其餘元素(即所謂的平衡)的金屬基質的材料將具有以下性質：

- 高導熱性，
- 低膨脹(由分裂過程引起的固體膨脹和由於分裂氣泡形成引起的氣體膨脹)，
- 類似的熱膨脹，
- 在蒸汽中良好的高溫腐蝕行為且具有護套材料，
- 高延展性和
- 適當低的熱中子截面。

【0006】 金屬基質的這些性質使得核燃料丸適合作為事故容錯燃料(ATF)。

【0007】 由於整體膨脹小，核燃料丸可以裝在任何合適的護套管中以形成燃料棒。護套管可以例如由碳化矽或鈳基合金製成。核燃料丸不需要除了護套管以外額外的封裝。

【0008】 由於鈾的存在，金屬基質可以是活性可裂基質。與標準球體填充燃料相比且與非活性基質相比，活性可裂基質的優點包括較低鈾含量的損失。

【0009】 根據本發明的一個具體實例，金屬基質中的每個主要元素的濃度為至少5莫耳%。

【0010】 根據本發明的一個具體實例，合金是單相合金或者具有構成小於合金的5體積%沉澱物的近單相合金。

【0011】 與單相BCC金屬相比，單相合金的金屬基質的高延展性增加。增加的延展性導致護套管中核燃料丸經改良的燃料丸與護套互應作用(PCI)。

【0012】 根據本發明的一個具體實例，合金是高熵合金(HEA)，其具有

四個主要元素，沒有哪一個占主導地位。這些單相合金被命名為高熵合金(HEA)，因為它們的液態或隨機固溶體態具有明顯高於常規合金的混合熵。因此，在高熵合金中熵的影響更為顯著。

【0013】 根據本發明一個具體實例，合金是 $U_{5-6}Zr_{3-4}NbTi$ 。這種單相合金形成可能的用於核燃料丸的基質的高熵合金。

【0014】 $U_{5-6}Zr_{3-4}NbTi$ 的鈾密度約為 9.7 g/cm^3 ，與 UO_2 的鈾密度相似。

【0015】 根據本發明的一個具體實例，合金具有體心立方結構(BCC)。

【0016】 根據本發明的一個具體實例，金屬基質中可能的其餘元素的總濃度為至多5莫耳%，較佳至多4莫耳%，更佳至多3莫耳%，最佳最多2莫耳%。

【0017】 根據本發明的一個具體實例，陶瓷燃料顆粒均勻分散在基質中。

【0018】 根據本發明的一個具體實例，陶瓷燃料顆粒包含至少一種可裂材料，其係選自鈾系氧化物、鈾系氮化物、鈾系矽化物和鈾系碳化物之群。

【0019】 根據本發明的一個具體實例，陶瓷燃料顆粒包含至少一種可裂材料，其係選自 UO_2 、 U_3Si_2 、 U_3Si 、 USi 、 UN 、 PuO_2 、 Pu_3Si_2 、 Pu_3Si 、 $PuSi$ 、 PuN 、 ThO_2 、 Th_3Si_2 、 Th_3Si 、 $ThSi$ 以及 ThN 之群。

【0020】 所有這些可裂材料都適合分散在核燃料丸的單相合金中。核燃料丸的單相合金將在核反應器運行期間保護陶瓷顆粒免受任何有害的機械或化學效應。因此不需要進一步封裝陶瓷顆粒。

【0021】 根據本發明的一個具體實例，陶瓷燃料顆粒包含 UN 、 PuN 、 ThN 中的至少一種，其中陶瓷燃料顆粒的氮被濃化成比天然 N 含有更高百分比的同位素 ^{15}N 。

【0022】 所述目的也藉由最初定義的燃料棒來實現，燃料棒包含包圍多個如上述所定義的核燃料丸的護套管。

【0023】 所述目的也藉由上述所定義用於核反應器的燃料總成來實現，燃料總成包含多個該燃料棒。

【圖式簡單說明】

【0024】 現在將藉由對各種具體實例的描述並參照附圖來更加詳細地解釋本發明。

圖1示意性地揭示用於核反應器的燃料總成的縱向截面圖。

圖2示意性地揭示圖1中的燃料總成的燃料棒的縱向截面圖。

圖3揭示根據第一具體實例的核燃料丸的縱向截面圖。

【實施方式】

【0025】 圖1揭示用於核反應器中的燃料總成1，具體而言在水冷輕水反應器(LWR)中，諸如沸水反應器(BWR)或壓水反應器(PWR)。燃料總成1包含底部構件2、頂部構件3和在底部構件2和頂部構件3之間延伸的多個細長燃料棒4。燃料棒4借助多個間隔件5保持在其位置上。此外，燃料總成1 (例如在BWR中使用時)可以包含由虛線6表示並圍繞燃料棒4的流動通道或燃料箱。

【0026】 圖2揭示圖1的燃料總成1的一支燃料棒4。燃料棒4包含多個呈核燃料丸10形式的核燃料和包圍核燃料丸10的護套管11。燃料棒4包含密封護套管11的下端的底部塞12和密封燃料棒4的上端的頂部塞13。核燃料丸10在護套管11中佈置成一堆。護套管11因此包圍燃料丸10和氣體。彈簧14佈置在核燃料丸10堆和頂部塞13之間的上充氣部15中。彈簧14將核燃料丸10堆壓靠在底部塞12上。

【0027】 核燃料丸10的一個具體實例揭示在圖3中。核燃料丸10包含金屬基質20和分散在基質20中的可裂材料的陶瓷燃料顆粒21或者由金屬基質20和分

散在基質20中的可裂材料的陶瓷燃料顆粒21所組成。陶瓷燃料顆粒21可以均勻地且隨機地分散在基質20中。

【0028】 每個核燃料丸10中的陶瓷燃料顆粒21的數量可能非常高。顆粒/基質體積比可以小於0.01:1或者0.01:1到1:0.01。

【0029】 陶瓷燃料顆粒21可以具有球形或大致球形，或者可以是任何形狀的形式。

【0030】 陶瓷燃料顆粒21的尺寸可以變化。例如，陶瓷燃料顆粒21可以具有延伸部分(諸如球形實例中的直徑)，其落在在100微米至2000微米的範圍內。

【0031】 陶瓷燃料顆粒21包含至少一種可裂材料或者由至少一種可裂材料所組成。可裂材料係選自鈾系氧化物、鈾系氮化物、鈾系矽化物和鈾系碳化物之群。具體而言，可裂材料係選自 UO_2 、 U_3Si_2 、 U_3Si 、 USi 、 UN 、 PuO_2 、 Pu_3Si_2 、 Pu_3Si 、 PuSi 、 PuN 、 ThO_2 、 Th_3Si_2 、 Th_3Si 、 ThSi 以及 ThN 之群。陶瓷燃料顆粒21因此可包含這些材料中的一或多者或者由這些材料中的一或多者所組成。

【0032】 金屬基質20是由主要元素U、Zr、Nb和Ti以及可能的殘餘元素所組成的合金。金屬基質20的合金可具有體心立方(BCC)結構。

【0033】 合金是/可為單相合金或者具有構成小於合金的5體積%沉澱物的近單相合金。

【0034】 金屬基質20中的每個主要元素的濃度為至多5莫耳%且至少5莫耳%。

【0035】 金屬基質20中可能的其餘元素的總濃度為至多5莫耳%，較佳至多4莫耳%，更佳至多3莫耳%，最佳最多2莫耳%。

【0036】 金屬基質20的單相合金或者近單相合金為所謂的高熵合金

(HEA)。

【0037】 更具體地說，金屬基質20的單相合金或者近單相合金可為 $U_{5-6}Zr_{3-4}NbTi$ 。

【0038】 核燃料丸10還可以包含除了陶瓷燃料顆粒21以外的其他顆粒，具體而言包含中子吸收物質的吸收顆粒。這種具有高中子吸收截面的物質可以包含硼、鈷等。

【0039】 核燃料丸10可為燒結的核燃料丸10。主要元素和其餘元素的粉末與陶瓷燃料顆粒21以及可能的吸收顆粒混合以形成混合物。陶瓷燃料顆粒21可以已經被預先燒結。將混合物壓製成生坯，然後在合適的烘箱/爐中或任何其他合適的方法(諸如火花電漿燒結(SPS))將生坯燒結成核燃料丸10。

【0040】 核燃料丸10也可以作為替代方式以其他方式製造，例如藉由鑄造或擠壓。

【0041】 本發明不限於本文所揭示和描述的具體實例，但是可以在以下的申請專利範圍的範圍內變化和修改。

【符號說明】

【0042】

【發明摘要】

【中文發明名稱】 核燃料丸、燃料棒及燃料總成

【英文發明名稱】 A Nuclear Fuel Pellet, a Fuel Rod, and a Fuel Assembly

【中文】

本發明揭示一種用於核反應器的核燃料丸(10)。所述丸塊包含金屬基質(20)和分散在金屬基質中的可裂材料的陶瓷燃料顆粒(21)。金屬基質是由主要元素U、Zr、Nb和Ti以及可能的其餘元素所組成的合金。金屬基質中的每個主要元素的濃度為至多50莫耳%。

【英文】

A nuclear fuel pellet (10) for a nuclear reactor is disclosed. The pellet comprises a metallic matrix (20) and ceramic fuel particles (21) of a fissile material dispersed in the metallic matrix. The metallic matrix is an alloy consisting of the principle elements U, Zr, Nb and Ti, and of possible rest elements. The concentration of each of the principle elements in the metallic matrix is at the most 50 molar-%.

【指定代表圖】 圖3

【代表圖之符號簡單說明】

- 10 核燃料丸
- 20 基質
- 21 陶瓷燃料顆粒

【特徵化學式】

無

【發明申請專利範圍】

【第1項】一種用於核反應器的核燃料丸(10)，其包含金屬基質(20)和

分散在該金屬基質(20)中的可裂材料的陶瓷燃料顆粒(21)。

其特徵在於該金屬基質(20)是由主要元素U、Zr、Nb和Ti以及可能的其餘元素所組成的合金，其中該金屬基質中每個主要元素的濃度最多為50莫耳%。

【第2項】如請求項1所述之核燃料丸(10)，其中該金屬基質中的每個主要元素的濃度為至少5莫耳%。

【第3項】如請求項1至2中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該合金是單相合金或者具有構成小於合金的5體積%沉澱物的近單相合金。

【第4項】如前述請求項中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該合金為高熵合金(HEA)。

【第5項】如前述請求項中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該合金為 $U_{5-6}Zr_{3-4}NbTi$ 。

【第6項】如前述請求項中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該合金具有體心立方結構。

【第7項】如前述請求項中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該金屬基質(20)中可能的其餘元素的總濃度為至多5莫耳%。

【第8項】如前述請求項中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該陶瓷燃料顆粒(21)均勻分散在金屬基質(20)中。

【第9項】如前述請求項中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該陶瓷燃料顆粒(21)包含至少一種可裂材料，其係選自鈾系氧化物、鈾系氮化物、鈾系矽化物和鈾系碳化物之群。

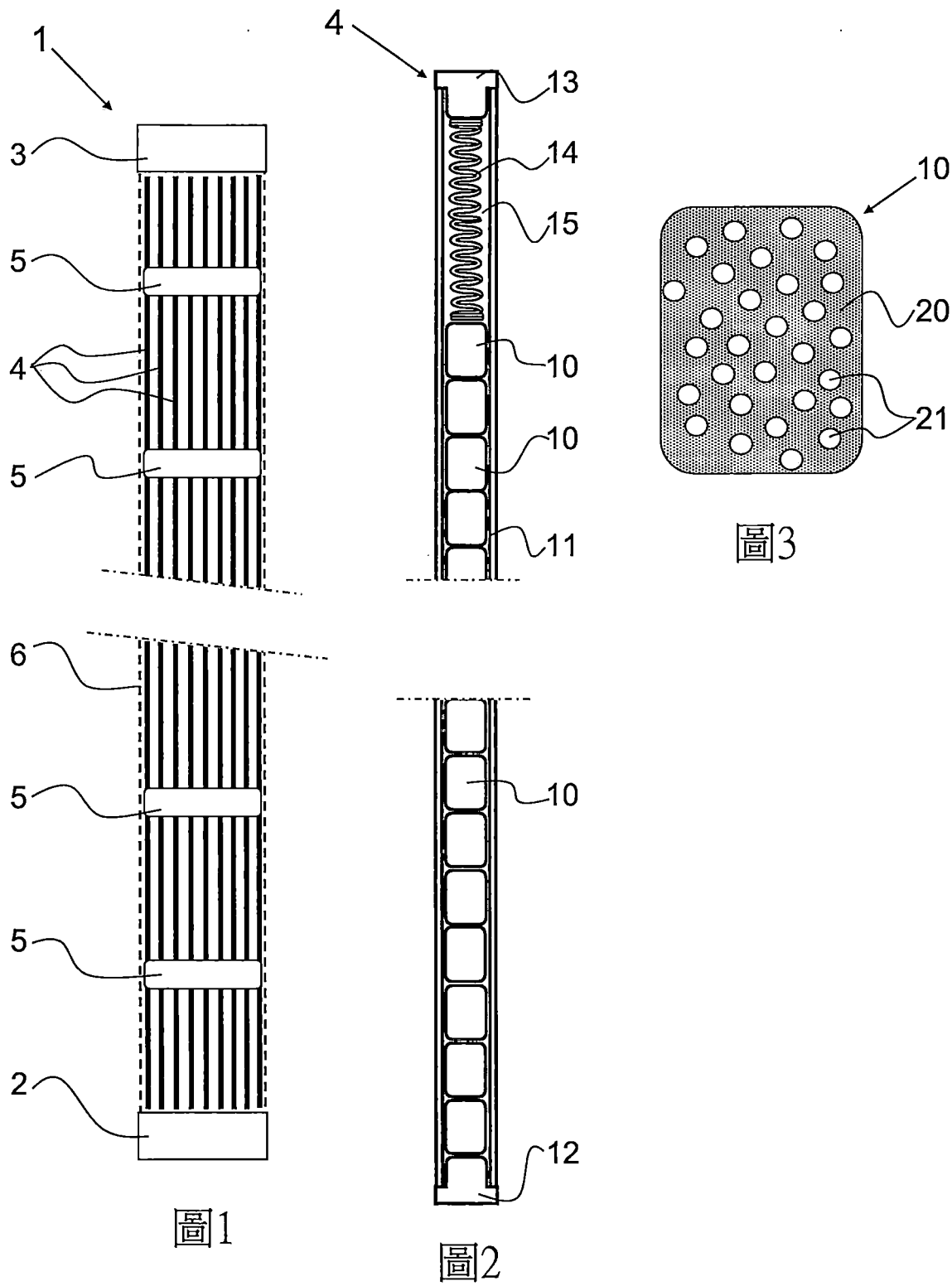
【第10項】如前述請求項中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該陶瓷燃料

顆粒(21)包含至少一種可裂材料，其係選自 UO_2 、 U_3Si_2 、 U_3Si 、 USi 、 UN 、 PuO_2 、 Pu_3Si_2 、 Pu_3Si 、 PuSi 、 PuN 、 ThO_2 、 Th_3Si_2 、 Th_3Si 、 ThSi 以及 ThN 之群。

【第11項】一種燃料棒(4)，其包含包圍多個如前述請求項中任一項所述之核燃料丸(10)的護套管(11)。

【第12項】一種用於核反應器的燃料總成，其包含多個如請求項11所述之燃料棒(4)。

【發明圖式】



散在基質20中的可裂材料的陶瓷燃料顆粒21所組成。陶瓷燃料顆粒21可以均勻地且隨機地分散在基質20中。

【0028】 每個核燃料丸10中的陶瓷燃料顆粒21的數量可能非常高。顆粒/基質體積比可以小於0.01:1或者0.01:1到1:0.01。

【0029】 陶瓷燃料顆粒21可以具有球形或大致球形，或者可以是任何形狀的形式。

【0030】 陶瓷燃料顆粒21的尺寸可以變化。例如，陶瓷燃料顆粒21可以具有延伸部分(諸如球形實例中的直徑)，其落在在100微米至2000微米的範圍內。

【0031】 陶瓷燃料顆粒21包含至少一種可裂材料或者由至少一種可裂材料所組成。可裂材料係選自鈾系氧化物、鈾系氮化物、鈾系矽化物和鈾系碳化物之群。具體而言，可裂材料係選自 UO_2 、 U_3Si_2 、 U_3Si 、 USi 、 UN 、 PuO_2 、 Pu_3Si_2 、 Pu_3Si 、 PuSi 、 PuN 、 ThO_2 、 Th_3Si_2 、 Th_3Si 、 ThSi 以及 ThN 之群。陶瓷燃料顆粒21因此可包含這些材料中的一或多者或者由這些材料中的一或多者所組成。

【0032】 金屬基質20是由主要元素U、Zr、Nb和Ti以及可能的殘餘元素所組成的合金。金屬基質20的合金可具有體心立方(BCC)結構。

【0033】 合金是/可為單相合金或者具有構成小於合金的5體積%沉澱物的近單相合金。

【0034】 金屬基質20中的每個主要元素的濃度為至多50莫耳%且至少5莫耳%。

【0035】 金屬基質20中可能的其餘元素的總濃度為至多5莫耳%，較佳至多4莫耳%，更佳至多3莫耳%，最佳最多2莫耳%。

【0036】 金屬基質20的單相合金或者近單相合金為所謂的高熵合金

(HEA)。

【0037】 更具體地說，金屬基質20的單相合金或者近單相合金可為 $U_{5-6}Zr_{3-4}NbTi$ 。

【0038】 核燃料丸10還可以包含除了陶瓷燃料顆粒21以外的其他顆粒，具體而言包含中子吸收物質的吸收顆粒。這種具有高中子吸收截面的物質可以包含硼、鈷等。

【0039】 核燃料丸10可為燒結的核燃料丸10。主要元素和其餘元素的粉末與陶瓷燃料顆粒21以及可能的吸收顆粒混合以形成混合物。陶瓷燃料顆粒21可以已經被預先燒結。將混合物壓製成生坯，然後在合適的烘箱/爐中或任何其他合適的方法(諸如火花電漿燒結(SPS))將生坯燒結成核燃料丸10。

【0040】 核燃料丸10也可以作為替代方式以其他方式製造，例如藉由鑄造或擠壓。

【0041】 本發明不限於本文所揭示和描述的具體實例，但是可以在以下的申請專利範圍的範圍內變化和修改。

【符號說明】

【0042】

- 1 燃料總成
- 2 底部構件
- 3 頂部構件
- 4 燃料棒
- 5 間隔件
- 6 虛線
- 10 核燃料丸

- 11 護套管
- 12 底部塞
- 13 頂部塞
- 14 彈簧
- 15 上充氣部
- 20 基質
- 21 陶瓷燃料顆粒

【發明申請專利範圍】

【第1項】一種用於核反應器的核燃料丸(10)，其包含金屬基質(20)和

分散在該金屬基質(20)中的可裂材料的陶瓷燃料顆粒(21)。

其特徵在於該金屬基質(20)是由主要元素U、Zr、Nb和Ti以及可能的其餘元素所組成的合金，其中該金屬基質中每個主要元素的濃度最多為50莫耳%。

【第2項】如請求項1所述之核燃料丸(10)，其中該金屬基質中的每個主要元素的濃度為至少5莫耳%。

【第3項】如請求項1至2中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該合金是單相合金或者具有構成小於合金的5體積%沉澱物的近單相合金。

【第4項】如請求項1至2中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該合金為高熵合金(HEA)。

【第5項】如請求項1至2中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該合金為 $U_{5-6}Zr_{3-4}NbTi$ 。

【第6項】如請求項1至2中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該合金具有體心立方結構。

【第7項】如請求項1至2中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該金屬基質(20)中可能的其餘元素的總濃度為至多5莫耳%。

【第8項】如請求項1至2中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該陶瓷燃料顆粒(21)均勻分散在金屬基質(20)中。

【第9項】如請求項1至2中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該陶瓷燃料顆粒(21)包含至少一種可裂材料，其係選自鈾系氧化物、鈾系氮化物、鈾系矽化物和鈾系碳化物之群。

【第10項】如請求項1至2中任一項所述之核燃料丸(10)，其中該陶瓷燃料

顆粒(21)包含至少一種可裂材料，其係選自 UO_2 、 U_3Si_2 、 U_3Si 、 USi 、 UN 、 PuO_2 、 Pu_3Si_2 、 Pu_3Si 、 PuSi 、 PuN 、 ThO_2 、 Th_3Si_2 、 Th_3Si 以及 ThN 之群。

【第11項】一種燃料棒(4)，其包含包圍多個如請求項1至10中任一項所述之核燃料丸(10)的護套管(11)。

【第12項】一種用於核反應器的燃料總成，其包含多個如請求項11所述之燃料棒(4)。