

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2017年11月2日(02.11.2017)



(10) 国際公開番号

WO 2017/188274 A1

(51) 国際特許分類:

G21C 1/02 (2006.01) *G21C 7/28* (2006.01)
G21C 7/02 (2006.01) *G21C 7/30* (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2017/016426

(22) 国際出願日: 2017年4月25日(25.04.2017)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:

特願 2016-087915 2016年4月26日(26.04.2016) JP

(71) 出願人: 株式会社クリア (CLEAR INC.) [JP/JP]; 〒1160011 東京都荒川区西尾久4丁目12番11号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 澄田 修生 (SUMITA Osao); 〒1160011 東京都荒川区西尾久4丁目12番11号 Tokyo (JP). 上野 勲 (UENO Isao); 〒1160012 東京都荒川区東尾久5丁目22番8号 Tokyo (JP). 横峯 健彦 (YOKOMINE Takehiko); 〒8160962 福岡県大野城市つつじヶ丘6丁目7番12号 Fukuoka (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人浅村特許事務所 (ASAMURA PATENT OFFICE, P.C.);

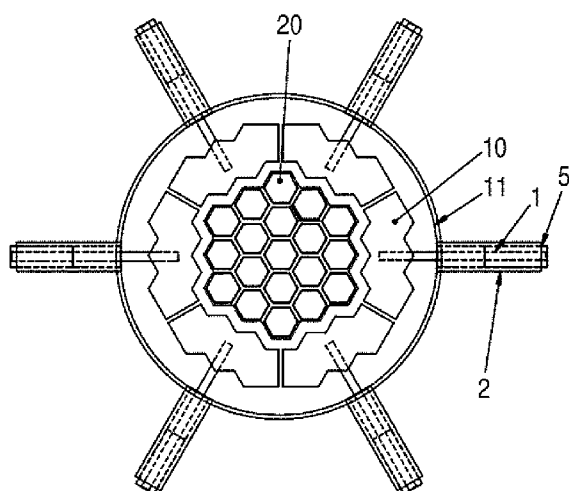
〒1408776 東京都品川区東品川2丁目2番24号 天王洲セントラルタワー Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS,

(54) **Title:** LOAD-FOLLOWING SMALL NUCLEAR REACTOR SYSTEM USING LIQUID METAL PRIMARY COOLANT

(54) 発明の名称: 液体金属一次冷却材を用いた負荷追従型制御小型原子炉システム



(57) **Abstract:** Engineering safety systems always have insufficiencies in terms of safety, and construction of a complete safety system causes installation costs for the safety system to become very high. Provided is a small nuclear reactor HAVING a load following control system in which a nuclear reaction in the nuclear reactor is naturally controlled by the generated heat, the small nuclear reactor being provided with: a reactor core provided with a plurality of fuel assemblies of metallic fuels containing uranium (U) 235, 238 and/or plutonium (Pu) 239; a primary coolant comprising a liquid metal; a neutron reflector which serves to control the nuclear reaction in the reactor core and is disposed to enclose the periphery of the reactor core; and a mechanism which contains a liquid or a gas having an expansion coefficient greater than that of the neutron reflector, converts the coefficient of volumetric expansion into an amount of linear thermal expansion, and, by using same, moves the neutron reflector or adjusts the spacing between the plurality of fuel assemblies.

SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

一 国際調査報告（条約第21条(3)）

(57) 要約：工学的安全系は安全性において常に不十分な点が残されており、完全な安全系を構築すると、安全系の設置コストが非常に大きくなる。ウラニウム（U）235、238および／またはプルトニウム（Pu）239を含有する金属性燃料の燃料集合体を複数備えた炉心と、液体金属からなる一次冷却材と、炉心の核反応を制御するための炉心の周囲を囲んで配置される中性子反射体と、中性子反射体よりも膨張率が大きい液体または気体を内蔵し、この体積膨張率を線熱膨張量に変換して、これを利用して中性子反射体を移動または複数の燃料集合体の間隔を調整する機構とを備えた、原子炉内の核反応が発生する熱で自然に制御される負荷追従型制御システムが組み込まれた小型原子炉を提供する。

明 細 書

発明の名称：

液体金属一次冷却材を用いた負荷追従型制御小型原子炉システム

技術分野

[0001] 本発明は、小型原子力発電システム用の原子炉システムと構造に関し、従来の工学的安全系の代わりに物理的な安全システムを組み込んだ原子炉構造に関する。即ち、原子炉内の核反応が自然に制御される負荷追従型制御システムが組み込まれた小型原子炉に関する。

背景技術

[0002] 従来の主な原子力発電システムでは、軽水を冷却材に用いた軽水炉型原子力発電システムが主流となっている。これに用いる原子炉には、金属酸化物燃料がジルカロイの被覆管に挿入された核燃料棒が装荷されている。核反応は炭化ホウ素等を含有した制御棒によりコントロールされている。さらに、核加熱により生成された蒸気がタービンに送られて発電される。軽水炉型原子炉システムはさらに、直接システムである沸騰水型と間接システムである加圧水型に大別される。間接サイクル型の原子炉システムである加圧水型炉は、一次冷却系と二次冷却系の間に蒸気発生器や熱交換器を備えている。

[0003] この種の大型の発電システムに用いられる原子炉は、低伝熱特性のウランウム（U）235又はプルトニウム（Pu）239を含有する金属酸化物をペレット状に成形した燃料を、被覆管に収納した多数の燃料棒を集合させた炉心を備える。大型の原子炉に用いられる炉心は、数10本程度の燃料棒を束ねた燃料棒の束を200束ほど集合させ、これら燃料棒の集合体の間に、燃料の反応速度を制御するための制御棒を配置している。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特願2015-75942

特許文献2：特開2015-165554

特許文献3：米国特許第2，495，745号

非特許文献

[0005] 非特許文献1：A. A. Bostrom, THE HIGH TEMPERATURE OXIDATION OF ZIRCALOY IN WATER, WAPD-104, March 19, 1954

非特許文献2：W. F. Murphy, W. N. Beck, F. L. Brown, B. J. Koprowski, and L. A. Neimark, POSTIRRADIATION EXAMINATION OF U-Pu-Zr FUEL ELEMENTS IRRADIATED IN EBR-I1 TO 4.5 ATOMIC PERCENT BURNUP, ANL-7602, November, 1969

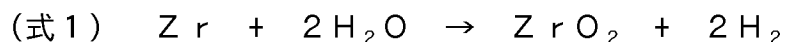
非特許文献3：特許出願技術動向調査報告書、熱電変換技術、平成26年3月、特許庁

非特許文献4：DESIGN AND FABRICATION OF A COUNTERFLOW DOUBLE-CONTAINMENT TANTALUM-STAINLESS STEEL MERCURY BOILER by Laurence W. Gertsma and David W. Medwid, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION ? WASHINGTON, D. C., MAY 1969

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] このような制御棒を用いた大型の原子炉にあっては、制御棒の位置を制御する機構が故障するなどして、制御棒が機能なくなると、炉心の核反応が暴走する危険がある。この他のより大きな問題点は、ジルカロイ-2、-4合金は、1000℃以上の高温で、以下の化学式により水と反応して水素ガスを発生させる、という危険性が大きく高まることである（非特許文献1）。



大型の軽水炉の場合、もし制御棒が駆動しないと核反応が急速に進み、温度が1000℃以上になる。このような場合、急速炉心冷却系等の安全系が作動して燃料棒の温度が上昇しないように設計されている。しかし、この安全系がもし機能しない場合、炉心で急速に水素ガスが発生し、空気中の酸素と反応、爆発する危険性が高い。軽水炉では、水素爆発等の危険性を避ける

ために、制御棒作動系および炉心冷却系のような多様な工学的安全系が組み込まれている。しかしながら、このような工学的安全系は高コストである。単位電力コストを低減するためには、原子炉を大型することが必要となる。従って、近年の軽水炉は大型化を前提に設計され、建設されている。

[0007] 一方、まだ開発段階であるが、一次冷却材として金属ナトリウム (Na) 等を用いる高速炉がある。日本の高速炉である「もんじゅ」においては、一次冷却材として金属 Na が、二次冷却材として水が用いられている。さらに、金属酸化物燃料が装荷され、中性子吸収材として炭化ホウ素を含有する制御棒を用いて核反応が制御されている。一次冷却材である金属 Na は二次冷却材である水と反応し、爆発性の水素ガスを発生する危険性があるので、一次冷却材の金属 Na 循環システムにおいて中間熱交換器を設置し、金属 Na 循環ラインを二重にしている。中間熱交換器で加熱された金属 Na の熱で、加熱器および蒸気発生器において二次冷却材である水を蒸気に変換し、蒸気タービンを回転し発電する。このように、高速炉においても、安全性のため原子力発電システムは複雑になる。

[0008] 以上説明したように、現在の商用原子炉において工学的安全系は不可欠であり、そのため、製造・建設コストが上昇することが避けられない。核分裂反応を利用した原子炉において安全系は基本的に不可欠である。しかし、前述の通り、工学的安全系は安全性において常に不十分な点が残されており、完全な安全系を目指すと、安全系の設置コストが非常に高くなるという問題がある。本発明は、前述の工学的安全系に代わって、物理的安全系を採用した原子炉システムを構築することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0009] 物理的安全系とは、原子炉炉心における自然現象に基づいて、核燃料の燃焼度が制御されることを意味している。原子炉における自然現象として、熱や中性子量等がある。この中で熱は非常に重要な因子である。原子炉を構成する材料として構造材、燃料等があるが、これらの材料は熱により必然的に熱膨張または熱収縮する。この、構造材が熱により変形する現象を利用して

、核反応を制御することが可能となる。以下に現象を具体的に説明する。

[0010] (1) 核燃料密度の変化による核反応度の制御

(1-1) 燃料自体の熱膨張

非特許文献2によれば、ウラニウム(U)－プルトニウム(Pu)－ジルコニウム(Zr)三元合金燃料を600℃から650℃に加熱すると、熱膨張係数が約3桁大きくなる。燃料棒自体が膨張すると、UまたはPuの密度が低下し、その結果核反応度が低下する。

(1-2) 燃料集合体の配置

原子炉炉心を構成する燃料棒集合体の配置が燃料棒集合体サポートの熱膨張により変化し、燃料集合体間の距離が大きくなると、実質的なUおよびPu密度が低下して核反応度が低下する。

[0011] (2) 中性子の漏れ確率／量の制御

燃料棒/燃料集合体に含有されたPu、U等の核分裂性物質から生成される中性子束は、原子炉外等の系外に漏れる中性子と、燃料棒に再吸収され核分裂に寄与する中性子の二種類に大別される。系外に漏れる中性子の割合は次のパラメータに依存する。

(2-1) 反射体の効率

炉心の中性子束密度は、炉心を囲む反射体の反射効率に大きく依存し、効率的な反射体を利用することにより中性子増倍係数 K_{eff} を1以上にすることが可能となる。この反射効率を炉心の熱出力に応じて変化させることにより、負荷追従型制御方式が可能となる。

(2-2) 冷却材の特性

本発明で用いる冷却材としては、金属Na、鉛(Pb)－ビスマス(Bi)、Pb、Sn単体が挙げられる。ここで、各々の特性を説明する。

[0012] (冷却材である金属ナトリウムの密度)

金属Naの密度は温度に依存しており、具体的には熱膨張率に依存している。温度が上がると密度が低下するため、中性子漏れ確率が大きくなり、結果として中性子増倍係数 K_{eff} が低下して1に近づき、さらに温度が上がると

K_{eff} が1以下となり、原子炉の臨界を維持することが不可能となる。逆に温度が下がると、中性子漏れ確率が低下して K_{eff} が1以上となり、核分裂連鎖反応を維持することが可能となる。

[0013] なお、金属Naの沸点は880℃であるので、通常ボイドの形成は問題とならないが、燃料棒に接触している金属ナトリウムは高温となり、沸点以下の微少なボイドが形成される可能性がある。この結果、反応度のボイド係数が「正」となる問題点が残る。しかし、高温で中性子の漏れ量が大きくなるとこのボイド係数の問題点がなくなる優位点がある。

[0014] (その他の冷却材)

高速炉の冷却材として、金属Na以外に、中性子吸収断面積が小さく中性子束に影響しないPbがあるが、融点が325℃と比較的高いことが欠点である。融点を下げることが可能なPb-Bi (45.5%Pb-55.5%Bi)も有効な冷却材候補である。Pb-Biの融点は125℃へと低下する。また、Snは融点が232℃、沸点が2602℃であり、これも有望な一次冷却材候補である。

[0015] (2-3) 原子炉表面積／体積比

生成される中性子量は原子炉の体積に依存しており、また中性子漏れ量は原子炉表面積に依存する。即ち、漏れる中性子の割合は、原子炉表面積／体積の比に依存する。表面積の割合が大きくなると漏れ中性子の割合が大きくなる。

他方、生成される中性子量は、金属燃料棒に含有されている核分裂性Pu、Uの濃度にも依存する。

以上のような熱特性、中性子量の変化による反射体の熱変形を利用して、炉芯を構成する核燃料の核反応を制御することができる(特許文献1)。

[0016] 本発明は、金属燃料棒集合体を装荷した負荷追従制御型原子炉の炉心構造に関し、さらに、固体に比較して熱膨張率がより大きい液体金属等の液体あるいは気体の熱膨張を利用した負荷追従型制御機構を組み込んだ原子炉の構造に関する。

[0017] まず、液体金属の熱膨張と核燃料の臨界特性との関係について説明する。
臨界特性は以下の因子に依存する。

(1) 中性子束

(1-1) 中性子発生確率

(1-2) 中性子漏れ確率と反射体による漏れ確率の低減

(1-3) 中性子吸収確率と中性子吸収体と中性子束

(2) 核分裂性物質濃度

(2-1) 核燃料棒におけるUまたはPu等の核分裂性物質濃度

(2-2) 燃料集合体間の距離を変えることによる実質的な核分裂性物質濃度

[0018] (1)において、核分裂性物質濃度を物理的に高めることは容易である。
しかし、濃度を高めると、核兵器を製造することが可能となる。核兵器製造を防止するために、米国では核分裂性物質濃度を20%以下に抑えている。
さらに、本発明は負荷追従型制御方式の炉心を対象にしている。具体的には、炉心核反応度が上がった時、自然現象により核反応度が下がり、逆に炉心核反応度が下がった時、自然現象により核反応度が上がる機構を対象としている。ここで使用する自然現象は材料の熱膨張である。構造材は炉心温度の変化に対応して熱膨張／熱収縮する。このような構造材の熱膨張／熱収縮を利用して核分裂性物質濃度を変化させること、および中性子束を変化させることにより核反応度を制御する。

[0019] (熱膨張／熱収縮を利用した中性子束の制御)

特許文献1に開示されている通り、燃料集合体の周囲に設置した固体状反射体支持体の熱膨張を利用した反射体の変形により反射体効率を変化させる。例えば、支持構造体にスパイラル状／コイル状の支持体を取り付ける。このような形状にして支持体の寸法を大きくすることにより熱膨張量を大きくし、熱膨張変化率を大きくすることが可能となる。本発明では、熱膨張／熱収縮量を増加させる別の方法として液体金属または気体を利用する。負荷追従型制御を効率的に行うためにはできるだけ熱膨張率を大きくすることが望

ましい。ここで重要な点は、膨張率には線膨張率 α と体積膨張率 β があることである。また、 α と β には近似的に以下の式で表わされる関係がある。

$$(式2) \quad \beta = 3 \alpha$$

この式は、体積膨張率を線膨張率に変換する機構を利用すれば、線膨張率を大きくすることが可能となることを示している。

[0020] この考え方に基づいた変換機構の一例を図1に示す。図1に示すようにシリンダー2のなかにピストン1を挿入し、ピストン1に反射体取付け治具4と反射体固定治具5を取り付ける。シリンダー2とピストン1の間には、液体または気体の漏洩を防止するために、潤滑機能と漏洩防止機能をもつ二硫化モリブデン (MoS_2)、銅 (Cu) またはグラファイトを潤滑剤として用いてもよい。

[0021] 反射体を効率良く移動させるためには線膨張量が重要である。線膨張量をさらに大きくするためには、図1に示すような液体金属タンク30を設け、さらに体積膨張する部材の体積、即ち液体金属または気体のタンクの容量を大きくすることにより線膨張量が大きくすることができる。タンク30の容量をV、ピストン1の断面積をS、温度差を Δt とすると、ピストンの移動量 δ は次式で表される。

$$(式3) \quad \delta = \beta \Delta t V / S$$

ここでVはシリンダー内の液体金属体積V1と付属タンク内の液体金属容量V2の和となる。

$$(式4) \quad V = V1 + V2$$

このように、液体金属タンクの容量を大きくし、ピストンの断面積を小さくするとピストンの移動量 δ は大きくなり、その結果反射体の移動量が大きくなる。

[0022] 図1に示す様なピストンとシリンダーとを設置した熱膨張機構を分轄型反射体に接続した反射体移動機構の一例を図2に示す。ピストン1を反射体取付け治具5を介して分轄型反射体10に接続し、さらに、シリンダー2を反射体移動機構固体円筒11に固定する。シリンダー2内には液体金属または

気体を充填する。液体金属または気体の外部への漏洩防止のためにベローズ 15 が設けられている。シリンダー 2 内の液体金属または気体の膨張量が大きくなると、シリンダー 2 内のピストン 1 は外側に移動し、その結果、6 分轄された反射体 10 が外側に移動する。中性子等の放射線、および高温等の原子炉の環境を考慮すると、有望な液体金属の候補としてとして、水銀 (Hg)、ナトリウム (Na)、カリウム (K)、鉛 (Pb)、鉛-ビスマス (Pb-Bi) が挙げられる。さらに、気体としてはヘリウム (He)、アルゴン (Ar) 等が挙げられる。一方、液体金属または気体を収納する容器の膨張係数はなるべく小さくすることが必要である。この視点から、容器の材質としては、炭素 (C)、炭化ケイ素 (SiC)、窒化ケイ素 (SiN)、ニッケル鋼、タングステン鋼があげられる。

[0023] 本発明の小型原子力発電システムの具体的構成は以下のとおりである。

ウランウム (U) 235、238 およびプルトニウム (Pu) 239 のいずれか一方又は双方を含有する金属性燃料を被覆管に封入した複数の燃料棒からなる燃料集合体を複数備えた炉心と、

前記炉心を収納した原子炉容器と、

前記原子炉容器内に充填され、前記炉心によって加熱される金属ナトリウム (Na)、鉛 (Pb)、錫 (Sn) または鉛-ビスマス (Pb-Bi) の内の 1 つからなる一次冷却材と、

炉心の核反応を制御するための、前記炉心の周囲を囲んで配置される中性子反射体と、中性子反射体移動機構および／または燃料集合体間隔調整機構を含み、

前記中性子反射体は、前記炉心から放射される中性子の実効増倍係数を 1 以上に維持して前記炉心を臨界状態とする中性子反射効率を有し、

前記中性子反射体移動機構および燃料集合体間隔調整機構は、前記中性子反射体よりも膨張率が大きい液体または気体を内蔵し、該液体または気体の体積熱膨張量を線熱膨張量に変換する機構を有し、

前記反射体移動機構は、前記中性子反射体に結合され、前記原子炉容器内

の温度に対応した前記線熱膨張量に変換された熱膨張による変位により、前記中性子反射体と前記炉心の間隔を変化させ、これにより前記中性子反射効率を変化させるように構成され、

前記燃料集合体間隔調整機構は、前記炉心の複数の前記燃料集合体の間隔を設定する部材に結合され、前記原子炉容器内の温度に対応した前記線熱膨張量に変換された熱膨張による変位により、前記燃料集合体の間隔を変化させ、これを利用して中性子実効増倍係数を変化させるように構成され、

前記中性子反射体移動機構および／または前記燃料集合体間隔調整機構により、温度による負荷追従型制御が可能となっている小型原子炉を備えた小型原子力発電システムである。

[0024] さらに、前記金属性燃料は、 U^{235} と Pu^{239} を合計した比率が20%以下である、 $U-Pu-Zr$ 三元金属性燃料としてもよい。

[0025] また、液体または気体の体積熱膨張量を線熱膨張量に変換する前記機構は、液体または気体を注入したシリンダー状容器と、該容器内に前記液体または気体を密封するように挿入したピストン状部材とを備えた機構とすることができる。

[0026] また、前記シリンダー状容器と前記ピストン状部材の間に、前記液体または気体の漏洩を防止するためのペローズを取り付けてもよい。

[0027] あるいは、前記シリンダー状容器と前記ピストン状部材の間に、前記液体または気体の漏洩を防止するために、潤滑機能と漏洩防止機能をもつ潤滑剤として二硫化モリブデン、銅またはグラファイトを用いてもよい。

[0028] 膨張率が高い液体は、リチウム(Li)、カリウム(K)、ナトリウム(Na)、水銀(Hg)、鉛(Pb)、鉛-ビスマス(Pb-Bi)、ガリウム(Ga)、亜鉛(Zn)の中から選択した液体金属とすることができる。一方、気体としてはヘリウム(He)またはアルゴン(Ar)とすることができる。

[0029] また、前記シリンダー状容器と前記ピストン状部材とを用いた体積熱膨張量を線熱膨張量に変換する機構に加えて、前記シリンダー状容器に前記シリ

ンダー状容器より大きな容量のタンクを結合することにより、より大きな体積熱膨張量を線熱膨張量に変換する機構を有することができる。

[0030] 本発明の小型原子力発電システムは、炉心を囲む、周囲方向で2つ以上に分割された概ね円筒状の前記中性子反射体の外周に、反射体移動機構固定円筒を配置し、上記中性子反射体の分割数以上の数の液体または気体を密封した前記シリンダー状容器、または前記シリンダー状容器と前記タンクを、前記反射体移動機構固定円筒に結合し、前記シリンダー状容器、または前記シリンダー状容器と前記タンクの中を貫く前記ピストン状部材と、前記中性子反射体とを結合して、前記中性子反射体を前記反射体移動機構固定円筒に対して温度変化に応じた線熱膨張量だけ移動させることにより、前記中性子反射体と前記燃料集合体との間隔を制御して負荷追従型制御を行う。

[0031] 本発明の別の小型原子力発電システムは、炉心を囲む、周囲方向で2つ以上に分割された概ね円筒状の前記中性子反射体の内側に、分割された各中性子反射体に結合され、前記炉心の中心から放射状に配置された前記ピストン状部材が挿入された複数の前記シリンダー状容器と、前記放射状に配置された複数のシリンダー状容器の中心に液体または気体用タンクを設置し、前記タンクおよび前記複数のシリンダー状容器内に液体または気体を密封し、温度変化に応じた線熱膨張量だけ前記中性子反射体を半径方向に移動させることにより、前記中性子反射体と前記燃料集合体との間隔を制御して負荷追従型制御を行う。

[0032] 本発明のまた別の小型原子力発電システムは、周囲方向に2つ以上に分割され、さらに半径方向に2つに分割され、さらに高さ方向に2つ以上に分割された複数のリング状の反射体であって、外側のリング状反射体と内側のリング状反射体の2つのグループのリング状反射体のそれぞれが、横方向から見て重なり合わないよう、高さ方向にずらして交互に配置され、全体として炉心を囲む概ね円筒状の中性子反射体を備え、

上下方向に移動可能なピストン状部材を有するシリンダー状容器と、該シリンダー状容器と流体連通したタンクからなる反射体移動機構をさらに備え

、

前記ピストン状部材が前記外側のリング状反射体のグループに固定され、前記内側のリング状反射体のグループが前記タンクに固定され、前記シリンダー状容器と前記タンクには液体または気体が密封され、前記外側のリング状反射体のグループを、温度変化に応じた前記液体または気体の線熱膨張量だけ前記ピストン状部材により上下方向に移動させて、前記外側のリング状反射体と前記内側のリング状反射体の各グループの間にスリットを形成し、該スリットの間隔により中性子漏れ量を制御して負荷追従型制御を行う。

[0033] 本発明のまた別の小型原子力発電システムは、複数の前記燃料集合体が概ね同心円状に配置され、かつ同心円状グループに分けられ、ピストンが挿入された複数のシリンダーおよびタンクが前記燃料集合体の上部および／または下部に配置され、前記複数のシリンダーが前記タンクを中心にして放射状に配置され、前記シリンダーと前記タンクは流体連通して液体または気体が密封され、前記ピストンが前記同心円状グループのそれぞれに接続され、温度変化に応じた前記液体または気体の線熱膨張量だけ、前記燃料集合体の前記同心円状グループを半径方向に移動させることにより、炉心を負荷追従型制御する。

[0034] 前記炉心の周囲を囲んで設置された前記中性子反射体は、前記炉心の高さ寸法より小さい高さに形成され、移動機構により前記炉心の下方側から上方側に向かって、または上方側から下方側に向かって移動できるように構成されてもよい。

[0035] または、前記燃料集合体の全長と同等の長さの前記中性子反射体を、前記燃料集合体の周囲に設置してもよい。

[0036] 本発明の小型原子力発電システムは、前記原子炉容器内に、前記反射体移動機構または前記燃料集合体間隔調整機能が取付けられた前記燃料集合体の周囲に、一次冷却材自然循環促進機能と中性子漏れ防止機能を有する金属製の円筒を配置し、さらに前記一次冷却材と二次冷却材との熱交換を行う熱交換器を前記円筒の周囲に配置してもよい。

[0037] 本発明の小型原子力発電システムは、前記燃料集合体の中心部に中性子吸収体を設置してもよい。

[0038] あるいは、前記中性子反射体の外側に中性子吸収体を設置してもよい。

また、前記中性子吸収体として、アクチノイド系放射性元素等の、放射性廃棄物等の処理に適した材料を用いてもよい。

[0039] 本発明の前記炉心は、ZrとU235、238、およびPu239とからなる合金、またはZrとU235、238およびPuのいずれか一方との合金からなる金属性燃料を、フェライト系ステンレス鋼、またはクロム・モリブデン鋼からなる被覆管に封入した燃料棒を複数備える。

[0040] 本発明の前記原子炉容器は、5 m以下の直径および20 m以下の高さを有する円筒状に形成され、前記原子炉容器に収納される炉心は、5～15 mmの直径および3.0 m以下の長さに形成された複数の燃料棒からなる。

[0041] 本発明の小型原子力発電システムは、前記原子炉によって加熱された前記一次冷却材が導管を介して供給されるとともに、前記一次冷却材と熱交換されて加熱される超臨界二酸化炭素または亜臨界二酸化炭素、軽水またはヘリウムからなる前記二次冷却材が循環する主熱交換器と、前記主熱交換器によって加熱された前記二次冷却材によって駆動される前記タービン発電システムとを前記原子炉の外部に備えることを特徴とする。

[0042] 本発明の別の小型原子力発電システムは、前記原子炉に前記一次冷却材が充填されるとともに、前記原子炉容器内の燃料によって加熱された前記一次冷却材と前記原子炉容器内の燃料とによって前記原子炉容器内の前記熱交換器で加熱された前記二次冷却材によって駆動される前記タービン発電システムを前記原子炉の外部に備えることを特徴とする。

前記二次冷却材は水銀（Hg）または軽水でもよい。

[0043] 原子炉内に設置した複数の前記熱交換器の、前記二次冷却材の入口配管群を第一のマニホールドに接続し、出口配管群を第二のマニホールドに接続してもよい。

[0044] 本発明のまた別の小型原子力発電システムは、移動機構に結合された前記

中性子反射体の中心の、前記燃料集合体または前記燃料集合体間隔調整機構が取付けられた前記燃料集合体を装荷した炉心の周囲に、内面に熱発電機能を有する熱発電素子を取付けた複数のチューブを設置し、原子炉内に一次冷却材を充填するとともに前記複数のチューブに二次冷却材を供給する。

[0045] 前記熱発電素子は、鉛・テルル系（Pb-Telluride系）、シリコン・ゲルマニウム系（Si-Ge系）、p型はLa-Fe-Sb、n型はCe-Co-Sb合金から成るフィルドスクッテルダイト系、酸化物系-金属系、p型はCa-Co、n型はCa、Mnのそれぞれ酸化物からなるオキサイド系の半導体からなる。

発明の効果

[0046] 本発明による小型原子力発電システム用の原子炉には、前述の工学的安全系に代わって、熱膨張または熱収縮を利用した中性子反射体移動機構または燃料集合体間隔調整機構という物理的安全系を採用したため、小型で安価な原子炉システムを提供できる。

図面の簡単な説明

[0047] [図1]図1は、本発明に係る中性子反射体移動機構を示す透視断面図である。
[図2]図2は、本発明に係る中性子反射体と移動機構を組合せた構造の概略斜視図である。
[図3]図3は、本発明の小型原子炉の炉心の実施例の透視上面図である。
[図4]図4は、燃料集合体の外観を示す図である。
[図5]図5は、本発明に係る燃料集合体の平均炉心半径と実効増倍係数との関係を示すグラフである。
[図6]図6は、本発明に係る実効増倍係数と炉心と反射体間の平均ギャップとの関係を示すグラフである。
[図7]図7は、本発明に係る燃料集合体と間隔調整機構の外観を示す図である。
[図8]図8は、本発明に係る燃料集合体間隔調整機構の上面図である。
[図9]図9は、本発明に係る実効増倍係数と平均燃料集合体間隔との関係を示

すグラフである。

[図10]図10は、本発明に係る液体タンク付反射体移動機構と燃料集合体の外観を示す概略斜視図である。

[図11A]図11Aは、本発明に係る反射体スリット調整型反射体移動機構の実施例の断面の概略斜視図である。

[図11B]図11Bは、本発明に係る反射体スリット調整型反射体移動機構の実施例の概略斜視図である。

[図12]図12は、本発明に係る反射体内側設置型反射体移動機構の実施例の透視平面図である。

[図13]図13は、本発明に係る燃料集合体の断面図である。

[図14]図14は、本発明に係る燃料集合体と反射体移動機構の外観を示す概略斜視図である。

[図15]図15は、本発明に係る原子力発電システムの、実効増倍係数の運転時間依存性の、中性子吸収体の有無による違いを示すグラフである。

[図16A]図16Aは、本発明に係る炉内熱交換器を設けた自然循環型原子力発電システムの透視斜視図である。

[図16B]図16Bは、本発明に係る炉内熱交換器を設けた自然循環型原子力発電システムの縦断面図である。

[図17]図17は、本発明に係る自然循環型原子力発電システムの実施例を示す模式的断面図である。

[図18]図18は、本発明に係る自然循環型原子力発電システムの別の実施例を示す模式的断面図である。

[図19]図19は、本発明に係る分割反射体自然循環型原子力発電システムの実施例を示す模式的断面図である。

[図20]図20は、本発明に係る分轄反射体型小型原子力発電システムの別の実施例を示す模式的断面図である。

[図21]図21は、本発明に係る超臨界二酸化炭素ガスタービン小型原子力発電システムの実施例を示す模式的断面図である。

[図22]図 2 2 は、本発明に係る熱発電機構型の小型原炉の実施例の断面の斜視図である。

[図23]図 2 3 は、本発明に係る第二冷却材として水銀を用いる小型原子力発電システムの実施例を示す模式的断面図である。

発明を実施するための形態

[0048] 本発明の実施例は、汎用核計算コード S R A C (Standard Reactor Analysis Code)を用いて得た結果に基づいたものである。S R A C は様々なタイプの原子炉の炉心解析に適用できる核計算コードシステムである。

まず、下記に示す小型原子炉炉心の基本仕様に基づいて、核反応を確認した。(基本仕様)

- ・ 炉心直径：85 cm、
- ・ 炉心高さ：200 cm
- ・ 燃料集合体：60 体
- ・ 燃料ピン直径：1 cm

以下、具体的な形状の小型原子炉の実施例について臨界計算を行い、その結果に基づいた実施例について、図を参照しながら説明する。

実施例 1

[0049] 本発明の第一の実施例による小型原子炉の概略断面構造を図 3 に示す。低合金鋼等からなる原子炉容器の中に燃料集合体 20 を装荷し、燃料集合体の周囲にグラファイトからなる分割中性子反射体 10 を設置する。この反射体は下部から上部に移動または上部から下部に移動が可能である。この反射体を横方向に移動させるために、反射体支持機構として反射体移動機構固定円筒 11 が設置され、これに液体金属用シリンダー 2、反射体固定治具 5、ピストン 1 を取り付け。この分轄反射体および反射体支持機構は原子炉上部に設置した駆動機構（非表示）に接続されている。しかしこれに限定されることはなく、燃料集合体の全長と同等の長さの反射体を、燃料集合体の周囲に設置してもよい。

[0050] 燃料集合体 20 の外観を図 4 に示す。フェライト径ステンレス鋼（フェラ

イト系鉄鋼材料の参照鋼の一つであるHT-9鋼 (Fe-12Cr-Mo-V、W) の被覆管の中に、Pu-U-Zr合金鋼からなる直径10mmφ、長さ200mmの燃料ピンを挿入して作製した1本の燃料棒21を、スペーサー22を用いて24本束ねて燃料集合体20とした。図3に示すモデル原子炉のように、分轄反射体の中には燃料集合体20を93体以上装荷した。核分裂性物質濃度はPu239とU235を合計して19%とした。

[0051] 図5は炉心平均寸法と中性子実効倍率(K_{eff})との関係を示す。図から分かる通り、炉心の平均半径が大きくなると、 K_{eff} が1を超える傾向を示す。本発明では、炉心の半径を $K_{eff} \sim 1$ に近い1以下の値に設定して、反射体を用いて $K_{eff} > 1$ にする。図6は炉心と反射体との間の平均距離(ギャップ)と中性子増倍係数(K_{eff})の関係を示す。図から分かるように、反射体が燃料集合体から離れると K_{eff} は小さくなり、逆にギャップが小さくなると K_{eff} は大きくなる。反射体が温度によりその位置が移動することを利用することにより、 K_{eff} を制御することが可能となる。即ち、炉心が高温になると、ギャップが大きくなって核反応度を下げ、温度が低下するとギャップが小さくなって核反応度は大きくなることを示している。即ち負荷追従型制御が可能となる。

実施例 2

[0052] 以上では、反射体を用いた負荷追従型制御方式に関して説明した。次に燃料集合体の間隔を換えることによる負荷追従型制御方式を説明する。

図7は燃料集合体位置移動機構を取付けた燃料集合体の外観を示す。図8は燃料集合体の上部と下部に取付ける、燃料集合体からなる炉心と燃料集合体の間隔を変化させる燃料集合体位置移動機構の平面図を示す。燃料集合体移動機構は、液体タンク30および下部液体タンク31にシリンダー2、ピストン1、燃料集合体支持体9、および燃料集合体連携部材35を取り付ける。この実施例で用いる液体金属の候補としては、 $\sim 400^{\circ}\text{C}$ 以下で液体となるガリウム(Ga)、水銀(Hg)、亜鉛(Zn)、カドミウム(Cd)、鉛(Pb)、鉛-ビスマス(Pb-Bi)、カリウム(K)、ナトリウム

(Na)、リチウム(Li)、錫(Sn)がある。これらの中で、Hg、KおよびNaは熱膨張率が大きいので実用上有効である。

[0053] 図9に、炉心の外縁部の燃料集合体の中心部燃料集合体からの距離と、実効増倍係数 K_{eff} の関係を示す。この図から分かるように、外縁部の燃料集合体が中心部から離れるに従って K_{eff} が小さくなり、最終的に未臨界となることが分かる。

実施例 3

[0054] 図10は、液体タンクとシリンダーを併用した反射体移動機構の実施例を示す。分轄反射体10にピストン1と反射体移動機構固定円筒11を取り付ける。図1に示したように、ピストン1を挿入するシリンダー2に液体タンク30を合体させる。シリンダーと液体タンクを合体させることにより、熱膨張に利用する液体金属の容量を増加させることが可能となる。全液体金属の増量により、反射体の変化率(移動量/温度差)が大きくなる。この結果、負荷追従型制御が容易となる。

この実施例の場合は、反射体を運転時間とともに上下方向に移動させることにより、小型原子炉の運転時間を延ばすことが可能となる。具体的には、燃料集合体下部から上部にかけて反射体を移動させることにより、燃料の燃焼部を移動させる。

実施例 4

[0055] 図11Aおよび11Bは、分割反射体を半径方向に二分割以上に分割する実施例を示す。半径方向の分割反射体は、内側分轄反射体14と外側分轄反射体13に分かれている。内側分轄反射体14と外側分轄反射体13は交互にずらされて高さ方向に重ねられている。内側分轄反射体14は内側分轄反射体固定治具15で互いに固定してある。外側分轄反射体13は反射体移動機構固定円筒11に結合されている。さらに、反射体移動機構固定円筒11とピストン1は結合されている。ピストン1を挿入するシリンダー2と液体タンク30は一体化されている。また、内側分轄反射体14と液体タンク30とは図示されていないが互いに固定されている。この構造により、液体タ

ンク 30 に充填した金属の熱膨張を利用して外側分轄反射体 13 を上下に移動させる。この液体金属に起因する移動により内側分轄反射体 14 と外側分轄反射体 13 との間に隙間が形成され、反射効率が低下する。この機構を利用することにより、負荷追従型制御が可能になる。

実施例 5

[0056] 図 12 は、反射体の内側に液体を利用した反射体移動機構を組み込んだ反射体構造の実施例を示す。具体的には、液体として、液体金属である Hg、K または Na を充填する。この実施例は、反射体内部に液体金属の熱膨張を利用した反射体移動機構を組み込む装置例である。8 個に分轄した反射体 10 の内部に液体金属移動機構が組み込んである。液体金属移動機構は、中心に液体タンク 30 を備え、その周りにピストン 1 を挿入したシリンダー 2 を 8 個取り付けてある。ピストン 1 と分轄反射体 10 は結合されている。この機構により、反射体 10 は液体金属温度上昇とともに外側に移動し、温度低下により反射体は内側に移動する。この結果負荷追従型制御が可能となる。本実施例の反射体構造は燃料集合体の上部または下部、あるいは両端に取付けるため、反射体を上下方向に移動させることはむずかしいので、反射体の高さを燃料集合体以上とすることが必要となる。

実施例 6

[0057] 次の実施例では、運転寿命を延ばすことを可能にする方法について説明する。まず、図 13 に示す通り、前述のように 93 本の燃料棒 21 からなる燃料集合体群 20 の中に、ボロン (B)、ガドリニウム (Gd) を含有する中性子吸収棒 25 を装荷する。この構造の炉心を反射体構造に装荷した状態を図 14 に示す。図 14 において、反射体移動機構固定円筒 11 の中に分割反射体 10 を装荷し、分轄反射体 10 を半径方向に移動させるために、液体金属を充填したシリンダー 2 を反射体移動機構固定円筒 11 に結合させる。この構造において核特性を検討した。原子炉運転時間を延ばすために、図 13 に示したような、当初の反応度に余裕を持たせた燃料集合体を装荷した。初期反応度が大きいと、過剰に核反応が進み過熱する危険性がある。そこで、

図 1 5 に示すように、可燃性中性子毒物からなる 2 0 % 以上の高濃度 B 1 0 を混入した中性子吸収体 2 5 を装荷することによって、初期過程における過剰反応度を下げることができる。初期反応度を低下させるその他の方法として、燃料棒に酸化ガドリニウム (Gd_2O_3) 等の中性子毒を添加する方法もある。

実施例 7

[0058] 図 1 6 A および図 1 6 B に、原子炉容器内に図 7 に示した負荷追従型制御方式の燃料集合体を設置した原子炉システムの実施例を示す。このシステムでは、原子炉容器内の一次冷却材として P b - B i を用いる。二次冷却材としては軽水を用いる。原子炉容器 5 0 の中に燃料集合体 2 0 を装荷する。図 7、図 8 で示したように、この燃料集合体 2 0 には、液体タンク 3 0 に結合されたシリンダー 2 等が接続され、液体タンク 3 0 に充填された液体金属である H g の膨張により、燃料集合体の間隔が広がる機構になっている。この燃料集合体 2 0 の周囲には、自然循環促進円筒 5 2 を設置する。この円筒 5 2 は煙突機能を有し、一次冷却材の自然循環を促進する。さらにこの円筒 5 2 に煙突機能と共に反射体の機能を持たせることにより、臨界特性を向上させると共に燃料集合体の燃焼寿命を延ばすことが可能となる。さらに、原子炉容器 5 0 の中の周囲に、一次冷却材と二次冷却材の熱交換をするための熱交換器 5 1 を設置する。また、この熱交換器の複数の二次冷却材入口配管を二次冷却材入口マニホールド 5 6 に接続する。そして、熱交換器の複数の二次冷却材出口配管を二次冷却材出口マニホールド 5 5 に接続する。

実施例 8

[0059] 実施例 7 で説明した原子炉を組み込んだ原子炉システムの実施例を図 1 7 に示す。原子炉容器 5 0 内の構成は実施例 7 と同様である。原子炉容器 5 0 の中には燃料集合体 2 0、液体タンク 3 0 および下部液体タンク 3 1 を主たる構成要素とする燃料集合体移動機構、自然循環促進円筒 5 2、熱交換器 5 1 が組み込まれている。熱交換器の入口配管用二次冷却材入口マニホールド 5 6 と出口配管用二次冷却材出口マニホールド 5 5 を原子炉容器 5 0 の周囲

に配置する。この実施例では二次冷却材として水を用いる。二次冷却材出口マニホールド55に接続された配管は蒸気タービン71に接続され、これを駆動して発電する。蒸気タービン71に組み合せられた復水器70で水に戻された水は、第一加熱器72と第二加熱器73で予備的に加熱された後、給水ポンプ75により冷却材入口マニホールド56を介して原子炉容器50内の熱交換器51に供給される。この実施例は、原子炉容器内で二次冷却材を加熱することにより熱交換器51内で直接蒸気を発生し、この蒸気を二次冷却材出口マニホールド55から取り出し、蒸気タービンを回転させることにより発電するシステムである。

実施例 9

[0060] 別の実施例について図18を用いて説明する。この実施例では、加圧器91を用いて、原子炉容器内では蒸気発生を抑制する。まず原子炉容器50の中には燃料集合体20、液体金属タンク30と31を主たる構成要素とする燃料集合体移動機構、熱交換器51を組み込む。さらに、燃料集合体の周囲に、一次冷却材の自然循環流動を促進するための自然循環促進円筒52を設置する。自然循環加熱された一次冷却材（Bi-Pb）から熱を吸収するために設けた、原子炉内燃料交換器の入口配管用二次冷却材入口マニホールド56と出口配管用二次冷却材出口マニホールド55を原子炉容器50周囲に取り付ける。この実施例では二次冷却材として水を利用する。二次冷却材出口マニホールド55に接続した配管は、主熱交換器90に接続される。主熱交換器90において発生した三次冷却水の水蒸気は、蒸気タービン71に接続され、タービン71は復水器70と組み合わせられて、タービンを駆動し、発電される。復水器70で水に戻った三次冷却水は第一加熱器72と第二加熱器73で予備的に加熱された後、給水ポンプ75により主熱交換器90に戻る。二次冷却水は二次冷却材入口マニホールド56を介して原子炉容器50内の熱交換器51に供給される。

実施例 10

[0061] 実施例9では、燃料集合体間隔調整機能を有した燃料集合体を装荷した原

子炉内で、液体金属（B i - P b）の一次冷却材を自然循環加熱させるシステムを説明した。本実施例では、図 19 に示すように、燃料集合体 20 周囲に分轄反射体 10 を設置する。この分轄反射体は、液体タンク 30 内に収納した液体金属の膨張／収縮を利用することにより制御する。さらに、反射体効果を向上させるために、分割反射体の外周に、反射体から漏れた中性子が反射により炉心に戻るのを防止することを目的とした中性子吸収筒 67 を設ける。この中性子吸収筒 67 と分轄反射体を組み合わせた構造は、一次冷却材自然循環を促進する機能をも合わせもつ。図 19 では、二次冷却材として水を用いる。水を加熱するために、原子炉容器 50 のなかに複数の熱交換器 51 を設置する。これらの熱交換器 51 が二次冷却材入り口マニホールド 56 および二次冷却材出口マニホールド 55 に接続される。熱交換器 51 内で蒸気となった二次冷却材はタービン 71 に送られ、蒸気が復水器 70 で水に戻る。水は第一加熱器 72、および第二加熱器 73 で予備的に加熱された後、給水ポンプ 75 により熱交換器 51 に再び供給される。

実施例 11

[0062] 次に、一次冷却材（B i - P b）を循環するシステムの実施例について図 20 を用いて説明する。図 20 において、原子炉容器 50 の中には燃料集合体 20、液体タンク 30 を主たる構成要素とする分轄反射体移動機構 10 が組込まれている。原子炉容器 50 には一次冷却材戻り配管 57 と一次冷却材出口配管 58 が取付けられている。この実施例では二次冷却材として水を用いる。加熱された一次冷却材が一次冷却材出口配管 58 から主熱交換器 90 に供給され、熱交換後、一次冷却材が戻り配管 57 を介して原子炉容器 50 に戻る。主熱交換器で生成された蒸気は、蒸気タービン 71 に接続され、これを駆動して発電する。蒸気タービン 71 に組合せられた復水器 70 で水に戻った水は、第一加熱器 72 と第二加熱器 73 で予備的に加熱された後、給水ポンプ 75 により主熱交換器 90 に供給される。

実施例 12

[0063] 一次冷却材（B i - P b）を循環するシステムの別の実施例について図 2

1を用いて説明する。図21において、原子炉容器50の中には燃料集合体20、液体タンク30を主たる構成要素とする分轄反射体移動機構10が組み込まれている。原子炉容器50には一次冷却材戻り配管57と一次冷却材出口配管58が取付けられている。この実施例では二次冷却材として超臨界二酸化炭素（または亜臨界二酸化炭素）を用いる。一次冷却材出口配管58から加熱された一次冷却材が主熱交換器90に供給され、熱交換後、一次冷却材が戻り配管57を介して原子炉容器50に戻る。主熱交換器で加熱された超臨界二酸化炭素（または亜臨界二酸化炭素）ガスは、隔離弁80を介して、圧縮器82と組合せられた超臨界二酸化炭素ガスタービン81に接続され、タービン81を駆動して発電する。ガスタービンから排出された超臨界二酸化炭素（または亜臨界二酸化炭素）ガスは冷却器83で冷却された後、圧縮器82に送られる。低温の超臨界二酸化炭素ガスは、再生熱交換器84で予備的に加熱された後、超臨界二酸化炭素（または亜臨界二酸化炭素）ガス供給ポンプ86により主熱交換器90に送られる。

[0064] 二次冷却材として超臨界二酸化炭素ガスを用いるこの小型原子力発電システムにおいて、一次冷却材と二次冷却材との間の熱交換の量に影響する熱効率を向上させるためには、基本的には、冷却材の熱伝導率を検討することが必要である。使用可能な気体中で、水素、ヘリウム、空気、窒素を比較すると、水素ガスの熱伝導率が最も大きく 0.172 (W/m/K) であり、ヘリウムはそれよりやや小さく、二酸化炭素ガスの熱伝導率は水素ガスの $1/10$ である。熱交換の量を大きくするためには、基本的に熱伝導率の大きい二次冷却材を選択することがのぞましい。特許文献1では、超臨界二酸化炭素ガスを二次冷却材として選択したが、可搬型で安全な小型原子力発電システムを前提とした場合、水素ガスの可燃性を考慮すると、二次冷却材としてヘリウムが有望である。

実施例 13

[0065] 原子炉内に熱発電素子を組み込んだ小型原子炉システムの実施例を図22に示す。熱発電素子は、熱と電力を変換する素子で、2種類の異なる金属ま

たは半導体を接合して、両端に温度差を与えるとゼーベック効果により起電力が生じる素子であり、発電にこれを利用する。大きな電位差を得るために p 型半導体と n 型半導体が組合せて使用される。具体的な例として以下が上げられる（非特許文献 3）。

(1) 常温から 500 K まで：ビスマス・テルル系（B i - T e 系）

(2) 常温から 800 K まで：鉛・テルル系（P b - T e 系）

(3) 常温から 1000 K まで：

(a) シリコン・ゲルマニウム系（S i - G e 系）

(b) フィルドスクッテルダイト系：p 型は L a - F e - S b、n 型は C e - C o - S b 合金、600℃/50℃、変換効率 6.2%

(c) 酸化物系-金属系：～800℃対応と～300℃対応の 組合せ

(d) オキサイド系：p 型は C a - C o、n 型は C a、M n のそれぞれ酸化物：600-400℃/50℃

パナソニック株式会社は、ゼーベック効果を利用した熱発電素子を用いた熱発電チューブを製作している。この技術の内容は特許文献 2 に説明されている。このようなチューブ型熱電子を、熱交換器チューブと同様に原子炉内に組み込む。

[0066] 具体的には、図 22 において、原子炉 50 内に複数の燃料集合体 20 を装荷し、燃料集合体の間隔を制御する液体タンク 30 とシリンダー 2 を配置する。燃料集合体 20 の周りに一次冷却材自然循環促進円筒 52 を配置し、その外側に中性子吸収用円筒 67 を配置する。原子炉 50 内の上部に内部二次冷却材出口マニホールド 65 と、下部に内部二次冷却材入口マニホールド 66 を設置し、さらに、これらのマニホールド間にチューブ型熱発電システム 53 を設置する。

実施例 14

[0067] 前記実施例では、二次冷却材として水または超臨界二酸化炭素ガスを用いた。これらの材料を用いた場合、物質密度が金属に比較して小さいので、熱伝達率効率が小さい欠点がある。可搬型小型原子力発電システムを製造する

場合、システムをなるべく小さくすることが望ましい。このシステムの小型化に最も影響する因子は熱交換器である。熱伝達率効率が小さい冷却材を用いると熱伝達面積を拡大する必要がある、大きな問題点となる。熱伝達率効率が高い冷却材を利用することにより、熱伝達面積を小さくすることが可能となる。この実施例では、二次冷却材として水銀を採用する。水銀は常温で液体で、かつ沸点が356.7℃であるという特性を有しているので、小型原子力発電システムの二次冷却材として有望である。過去に、NASAにおいて移動体に搭載されるタービンとして検討され（非特許文献3）、実際に小型タービンの特許として出願されている（特許文献3）。

[0068] このような小型の水銀タービンを組込んだ、本発明による小型原子力発電システムの実施例について、図23を用いて説明する。原子炉容器50内に燃料集合体20を装荷し、燃料集合体には液体タンク30および下部液体タンク31を取り付けることにより、負荷追従型制御方式を可能にしている。原子炉容器50内には一次冷却材としてPb-Biを充填する。一次冷却材を自然循環させるために、燃料集合体20の周囲に自然循環促進円筒52を設置する。容器内に熱交換器51を設置し、熱交換器の入口配管を二次冷却材入口マニホールド56に接続し、出口配管を二次冷却材出口マニホールド55に接続する。炉心で加熱された、二次冷却材である水銀はタービン95に供給される。タービンは水銀コンデンサー98に接続されている。凝縮した水銀は水銀第一加熱器96で予備的に加熱された後、ポンプ97により原子炉容器50に供給される。

[0069] 上記記載は実施例についてなされたが、本発明はそれに限定されず、本発明の精神と添付の請求の範囲の範囲内で種々の変更、および修正をすることができることは当業者に明らかである。

符号の説明

- [0070] 1 ピストン、
 2 シリンダー、
 4 反射体取付け治具、

- 5 反射体固定治具、
- 9 燃料集合体支持体、
- 10 分轄反射体、
- 11 反射体移動機構固定円筒、
- 13 外側分轄反射体、
- 14 内側分轄反射体、
- 15 ベローズ、
- 20 燃料集合体、
- 21 燃料棒、
- 24 燃料集合体支持板、
- 25 中性子吸収棒、
- 30 液体タンク、
- 31 下部液体タンク、
- 35 燃料集合体連携部材、
- 50 原子炉容器、
- 51 熱交換器、
- 52 自然循環促進円筒、
- 53 チューブ型熱発電システム、
- 55 二次冷却材出口マニホールド、
- 56 二次冷却材入口マニホールド
- 57 一冷却材戻り配管、
- 58 一次冷却材出口配管、
- 65 内部二次冷却材出口マニホールド、
- 66 内部二次冷却材入口マニホールド、
- 67 中性子吸収筒、
- 70 復水器、
- 71 蒸気タービン、
- 72 第一加熱器、

- 7 3 第二加熱器、
- 7 5 給水ポンプ、
- 7 6 一次冷却材循環ポンプ、
- 8 0 隔離弁、
- 8 1 超臨界二酸化炭素ガスタービン、
- 8 2 圧縮機、 8 3 冷却器、
- 8 4 再生熱交換器、
- 8 5 超臨界二酸化炭素ガス循環ポンプ、
- 8 6 超臨界二酸化炭素ガス供給ポンプ、
- 9 0 主熱交換器、
- 9 1 加圧器
- 9 5 水銀蒸気タービン、
- 9 6 水銀第一加熱器、
- 9 8 水銀コンデンサー

請求の範囲

[請求項1]

ウランウム (U) 235、238およびプルトニウム (Pu) 239のいずれか一方又は双方を含有する金属性燃料を被覆管に封入した複数の燃料棒からなる燃料集合体を複数備えた炉心と、

前記炉心を収納した原子炉容器と、

前記原子炉容器内に充填され、前記炉心によって加熱される金属ナトリウム (Na)、鉛 (Pb)、錫 (Sn) または鉛-ビスマス (Pb-Bi) の内の1つからなる一次冷却材と、

炉心の核反応を制御するための、前記炉心の周囲を囲んで配置される中性子反射体と、中性子反射体移動機構および／または燃料集合体間隔調整機構を含み、

前記中性子反射体は、前記炉心から放射される中性子の実効増倍係数を1以上に維持して前記炉心を臨界状態とする中性子反射効率を有し、

前記中性子反射体移動機構および燃料集合体間隔調整機構は、前記中性子反射体よりも膨張率が大きい液体または気体を内蔵し、該液体または気体の体積熱膨張量を線熱膨張量に変換する機構を有し、

前記反射体移動機構は、前記中性子反射体に結合され、前記原子炉容器内の温度に対応した前記線熱膨張量に変換された熱膨張による変位により、前記中性子反射体と前記炉心の間隔を変化させ、これにより前記中性子反射効率を変化させるように構成され、

前記燃料集合体間隔調整機構は、前記炉心の複数の前記燃料集合体の間隔を設定する部材に結合され、前記原子炉容器内の温度に対応した前記線熱膨張量に変換された熱膨張による変位により、前記燃料集合体の間隔を変化させ、これを利用して中性子実効増倍係数を変化させるように構成され、

前記中性子反射体移動機構および／または前記燃料集合体間隔調整機構により、温度による負荷追従型制御が可能となっている小型原子

炉と、

二次冷却材と、

前記小型原子炉内で加熱された前記一次冷却材の熱を前記二次冷却材と熱交換させるための熱交換器と、

前記二次冷却材の熱を電力に変換するタービン発電システムとを備えた小型原子力発電システム。

[請求項2] 前記金属性燃料が、 U^{235} と Pu^{239} を合計した比率が20%以下である、 $U-Pu$ -ジルコニウム(Zr)三元金属性燃料である、請求項1に記載の小型原子力発電システム。

[請求項3] 液体または気体の体積熱膨張量を線熱膨張量に変換する前記機構が、液体または気体を注入したシリンダー状容器と、該容器内に前記液体または気体を密封するように挿入したピストン状部材とを備えた機構である、請求項1または2に記載の小型原子力発電システム。

[請求項4] 前記シリンダー状容器と前記ピストン状部材の間に、前記液体または気体の漏洩を防止するためのベローズを取り付けた、請求項1～3のいずれか1項に記載の小型原子力発電システム。

[請求項5] 前記シリンダー状容器と前記ピストン状部材の間に、前記液体または気体の漏洩を防止するために、潤滑機能と漏洩防止機能をもつ潤滑剤として二硫化モリブデン(MoS_2)、銅(Cu)またはグラファイトを用いる請求項1～4のいずれか1項に記載の小型原子力発電システム。

[請求項6] 膨張率が高い前記液体が、リチウム(Li)、カリウム(K)、ナトリウム(Na)、水銀(Hg)、鉛(Pb)、鉛-ビスマス($Pb-Bi$)、ガリウム(Ga)、亜鉛(Zn)の中から選択した液体金属である、請求項1～5のいずれか1項に記載の小型原子力発電システム。

[請求項7] 膨張率が高い前記気体が、ヘリウム(He)またはアルゴン(Ar)である、請求項1～5のいずれか1項に記載の小型原子力発電シ

ステム。

[請求項8] 前記シリンダー状容器と前記ピストン状部材とを用いた体積熱膨張量を線熱膨張量に変換する機構に加えて、前記シリンダー状容器に前記シリンダー状容器より大きな容量のタンクを結合することにより、より大きな体積熱膨張量を線熱膨張量に変換する機構を有する、請求項1～7のいずれか1項に記載の小型原子力発電システム。

[請求項9] 炉心を囲む、周囲方向で2つ以上に分割された概ね円筒状の前記中性子反射体の外周に、反射体移動機構固定円筒を配置し、上記中性子反射体の分割数以上の数の液体または気体を密封した前記シリンダー状容器、または前記シリンダー状容器と前記タンクを、前記反射体移動機構固定円筒に結合し、前記シリンダー状容器、または前記シリンダー状容器と前記タンクの中を貫く前記ピストン状部材と、前記中性子反射体とを結合して、前記中性子反射体を前記反射体移動機構固定円筒に対して温度変化に応じた線熱膨張量だけ移動させることにより、前記中性子反射体と前記燃料集合体との間隔を制御して負荷追従型制御を行う、請求項8に記載の小型原子力発電システム。

[請求項10] 炉心を囲む、周囲方向で2つ以上に分割された概ね円筒状の前記中性子反射体の内側に、分割された各中性子反射体に結合され、前記炉心の中心から放射状に配置された前記ピストン状部材が挿入された複数の前記シリンダー状容器と、前記放射状に配置された複数のシリンダー状容器の中心に液体または気体用タンクを設置し、前記タンクおよび前記複数のシリンダー状容器内に液体または気体を密封し、温度変化に応じた線熱膨張量だけ前記中性子反射体を半径方向に移動させることにより、前記中性子反射体と前記燃料集合体との間隔を制御して負荷追従型制御を行う、請求項1～7のいずれか1項に記載の小型原子力発電システム。

[請求項11] 周囲方向に2つ以上に分割され、さらに半径方向に2つに分割され、さらに高さ方向に2つ以上に分割された複数のリング状の反射体で

あって、外側のリング状反射体と内側のリング状反射体の2つのグループのリング状反射体のそれぞれが、横方向から見て重なり合わないように、高さ方向にずらして交互に配置され、全体として炉心を囲む概ね円筒状の中性子反射体を備え、

上下方向に移動可能なピストン状部材を有するシリンダー状容器と、該シリンダー状容器と流体連通したタンクからなる反射体移動機構をさらに備え、

前記ピストン状部材が前記外側のリング状反射体のグループに固定され、前記内側のリング状反射体のグループが前記タンクに固定され、前記シリンダー状容器と前記タンクには液体または気体が密封され、前記外側のリング状反射体のグループを、温度変化に応じた前記液体または気体の線熱膨張量だけ前記ピストン状部材により上下方向に移動させて、前記外側のリング状反射体と前記内側のリング状反射体の各グループの間にスリットを形成し、該スリットの間隔により中性子漏れ量を制御して負荷追従型制御を行う、請求項1～8のいずれか1項に記載の小型原子力発電システム。

[請求項12] 複数の前記燃料集合体が概ね同心円状に配置され、かつ同心円状グループに分けられ、ピストンが挿入された複数のシリンダーおよびタンクが前記燃料集合体の上部および／または下部に配置され、前記複数のシリンダーが前記タンクを中心にして放射状に配置され、前記シリンダーと前記タンクは流体連通して液体または気体が密封され、前記ピストンが前記同心円状グループのそれぞれに接続され、温度変化に応じた前記液体または気体の線熱膨張量だけ、前記燃料集合体の前記同心円状グループを半径方向に移動させることにより、炉心を負荷追従型制御する、請求項1に記載の小型原子力発電システム。

[請求項13] 前記炉心の周囲を囲んで設置された前記中性子反射体は、前記炉心の高さ寸法より小さい高さに形成され、移動機構により前記炉心の下方側から上方側に向かって、または上方側から下方側に向かって移動

できるように構成されている、請求項 1 に記載の小型原子力発電システム。

[請求項14] 前記燃料集合体の全長と同等の長さの前記中性子反射体を、前記燃料集合体の周囲に設置した、請求項 1 ～ 12 のいずれか 1 項に記載の小型原子力発電システム。

[請求項15] 前記原子炉容器内に、前記反射体移動機構または前記燃料集合体間隔調整機能が取付けられた前記燃料集合体の周囲に、一次冷却材自然循環促進機能と中性子漏れ防止機能を有する金属製の円筒を配置し、さらに前記一次冷却材と二次冷却材との熱交換を行う熱交換器を前記円筒の周囲に配置した、請求項 1 に記載の小型原子力発電システム。

[請求項16] 前記燃料集合体の中心部に中性子吸収体を設置した、請求項 1 ～ 15 のいずれが 1 項に記載の小型原子力発電システム。

[請求項17] 前記中性子反射体の外側に中性子吸収体を設置した、請求項 1 ～ 16 のいずれが 1 項に記載の小型原子力発電システム。

[請求項18] 前記中性子吸収体として、アクチノイド系放射性元素等の、放射性廃棄物等の処理に適した材料を用いた、請求項 16 または 17 に記載の小型原子力発電システム。

[請求項19] 前記炉心は、Zr と U235、238、および Pu239 とからなる合金、または Zr と U235、238 および Pu のいずれか一方との合金からなる金属性燃料を、フェライト系ステンレス鋼、またはクロム・モリブデン鋼からなる被覆管に封入した燃料棒を複数備えた、請求項 1 ～ 18 のいずれが 1 項に記載の小型原子力発電システム。

[請求項20] 前記原子炉容器は、5 m 以下の直径および 20 m 以下の高さを有する円筒状に形成され、前記原子炉容器に収納される炉心は、5 ～ 15 mm の直径および 3.0 m 以下の長さに形成された複数の燃料棒からなる、請求項 1 ～ 19 のいずれか 1 項に記載の小型原子力発電システム。

[請求項21] 前記原子炉によって加熱された前記一次冷却材が導管を介して供給

されるとともに、前記一次冷却材と熱交換されて加熱される超臨界二酸化炭素または亜臨界二酸化炭素、軽水またはヘリウムからなる前記二次冷却材が循環する主熱交換器と、前記主熱交換器によって加熱された前記二次冷却材によって駆動される前記タービン発電システムとを前記原子炉の外部に備えることを特徴とする、請求項1～20のいずれか1項に記載の小型原子力発電システム。

[請求項22] 前記原子炉に前記一次冷却材が充填されるとともに、前記原子炉容器内の燃料によって加熱された前記一次冷却材と前記原子炉容器内の燃料とによって前記原子炉容器内の前記熱交換器で加熱された前記二次冷却材によって駆動される前記タービン発電システムを前記原子炉の外部に備えることを特徴とする、請求項1～20のいずれか1項に記載の小型原子力発電システム。

[請求項23] 前記二次冷却材が水銀（Hg）または軽水である、請求項22に記載の小型原子力発電システム。

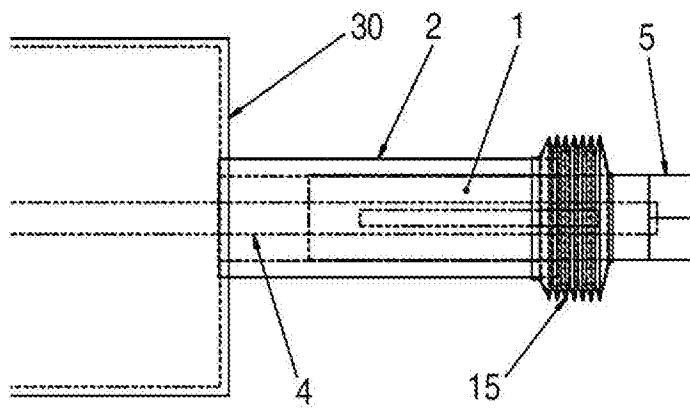
[請求項24] 原子炉内に設置した複数の前記熱交換器の、前記二次冷却材の入口配管群を第一のマニホールドに接続し、出口配管群を第二のマニホールドに接続した、請求項22または23に記載の小型原子力発電システム。

[請求項25] 移動機構に結合された前記中性子反射体の中心の、前記燃料集合体または前記燃料集合体間隔調整機構が取付けられた前記燃料集合体を装荷した炉心の周囲に、内面に熱発電機能を有する熱発電素子を取付けた複数のチューブを設置し、原子炉内に一次冷却材を充填するとともに前記複数のチューブに二次冷却材を供給する、請求項22～24のいずれか1項に記載の小型原子力発電システム。

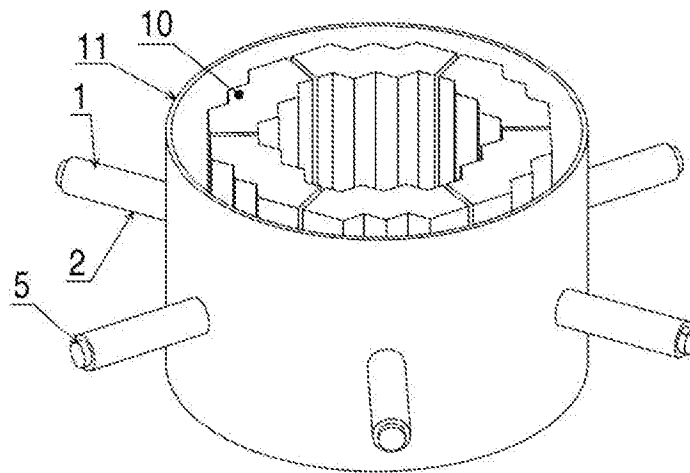
[請求項26] 前記熱発電素子が、鉛・テルル系（Pb-Te系）、シリコン・ゲルマニウム系（Si-Ge系）、p型はLa-Fe-Sb、n型はCe-Co-Sb合金から成るフィルドスクッテルダイト系、酸化物系-金属系、p型はCa-Co、n型はCa、Mnのそれぞれ酸化物か

らなるオキサイド系の半導体からなる、請求項 25 に記載の小型原子力発電システム。

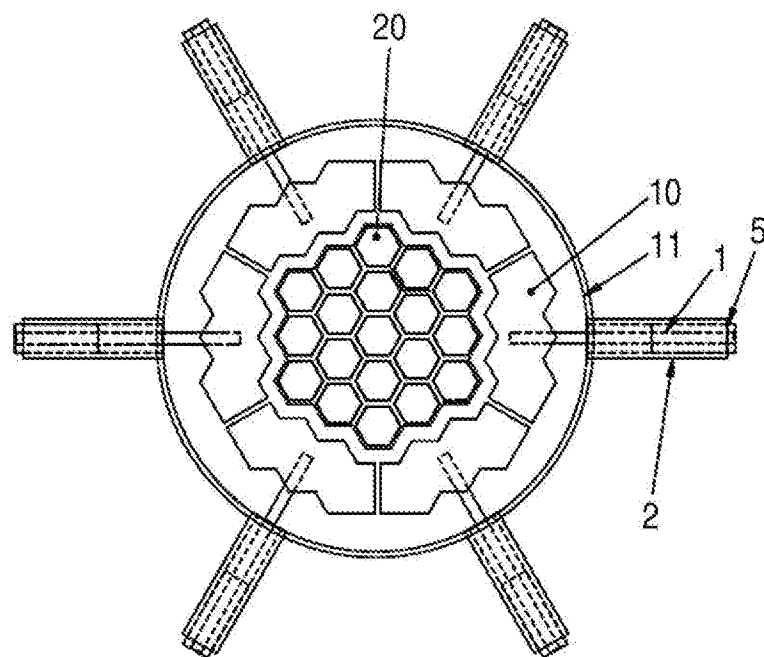
[図1]



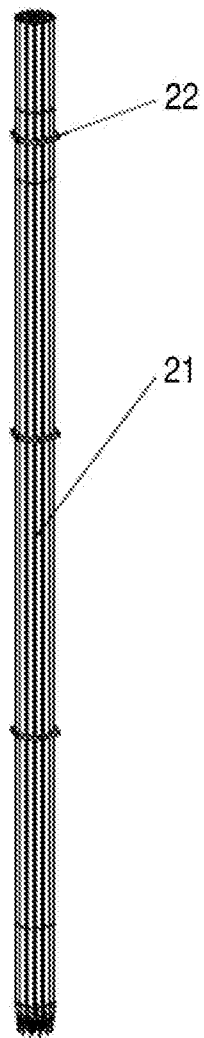
[図2]



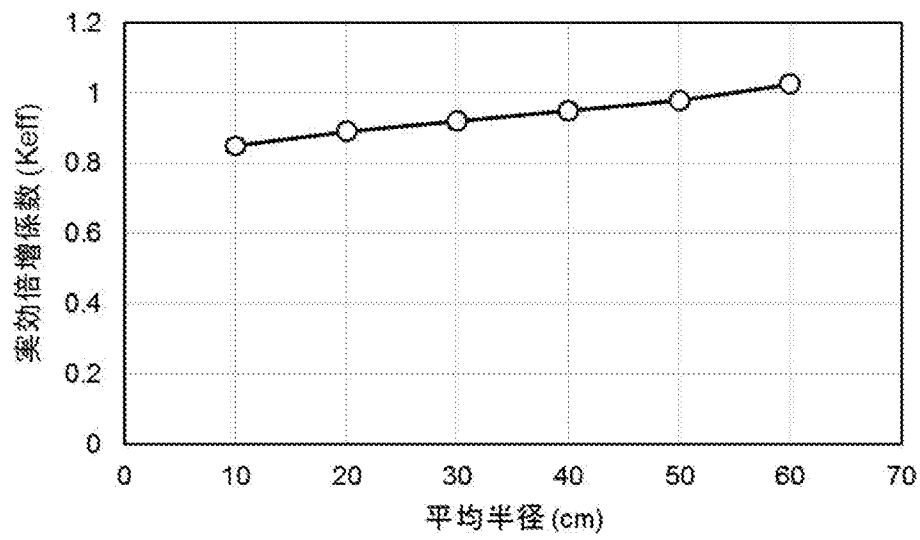
[図3]



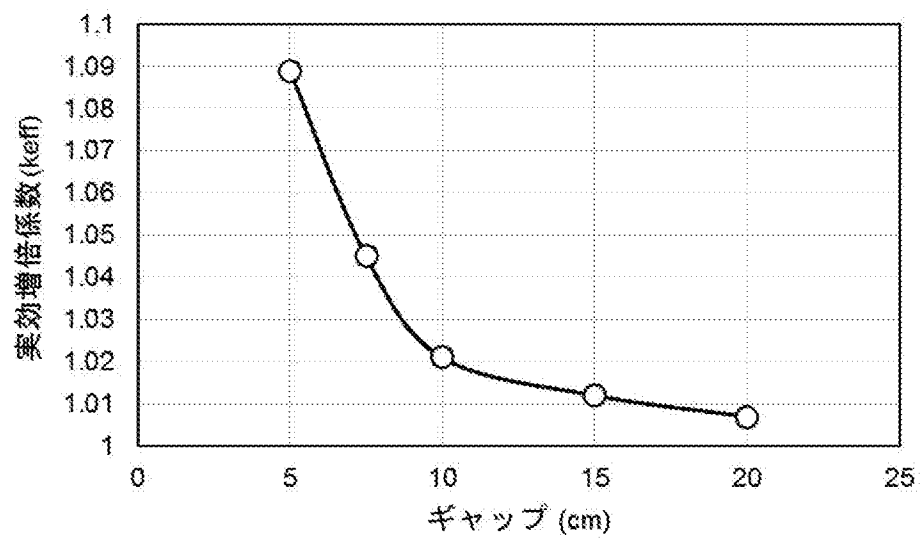
[図4]



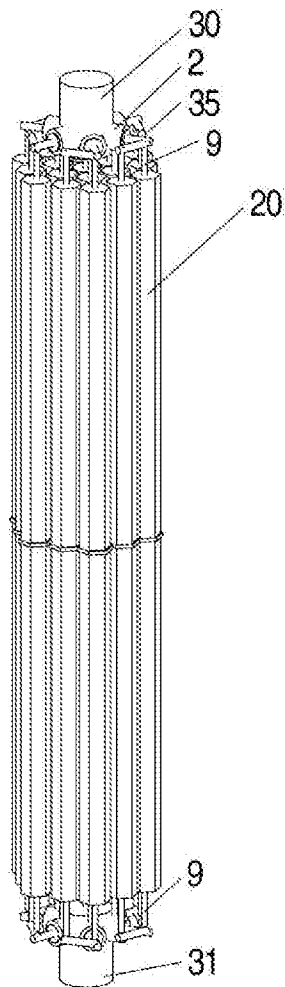
[図5]



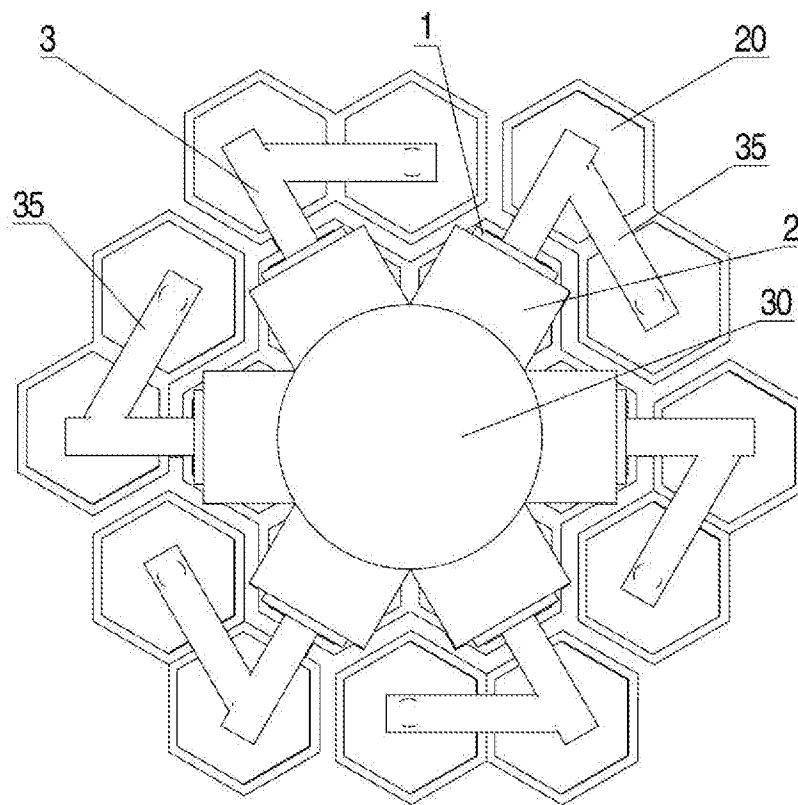
[図6]



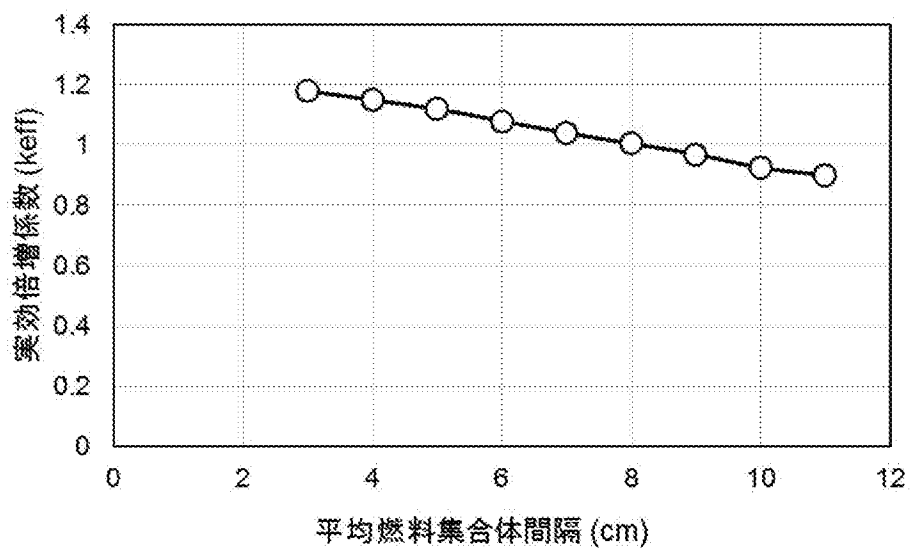
[図7]



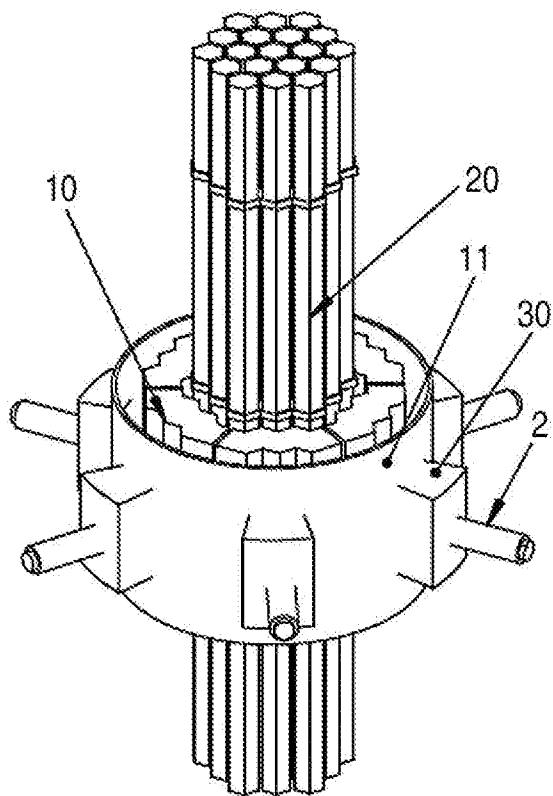
[図8]



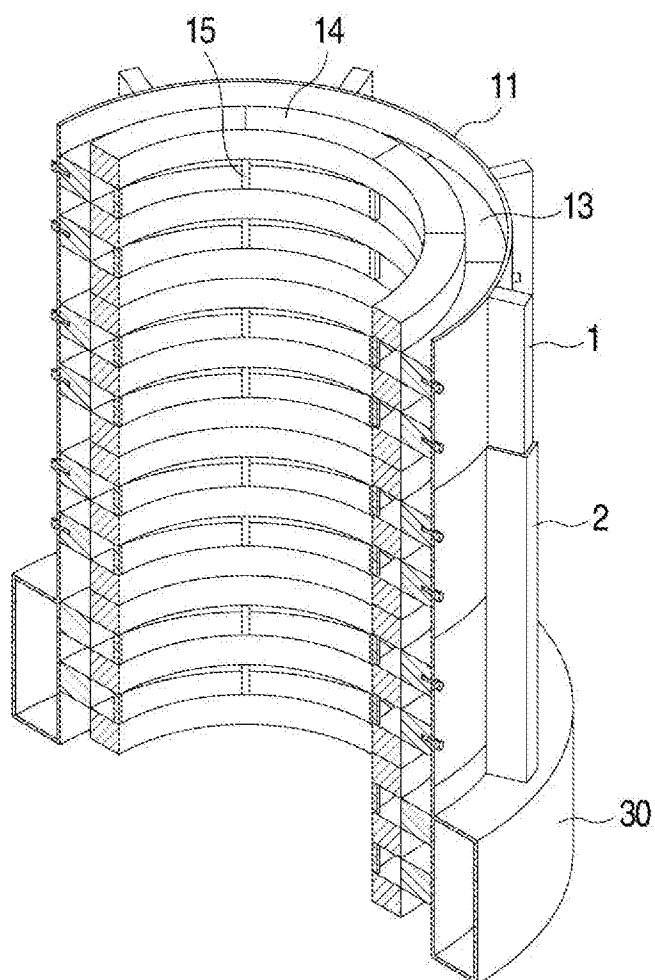
[図9]



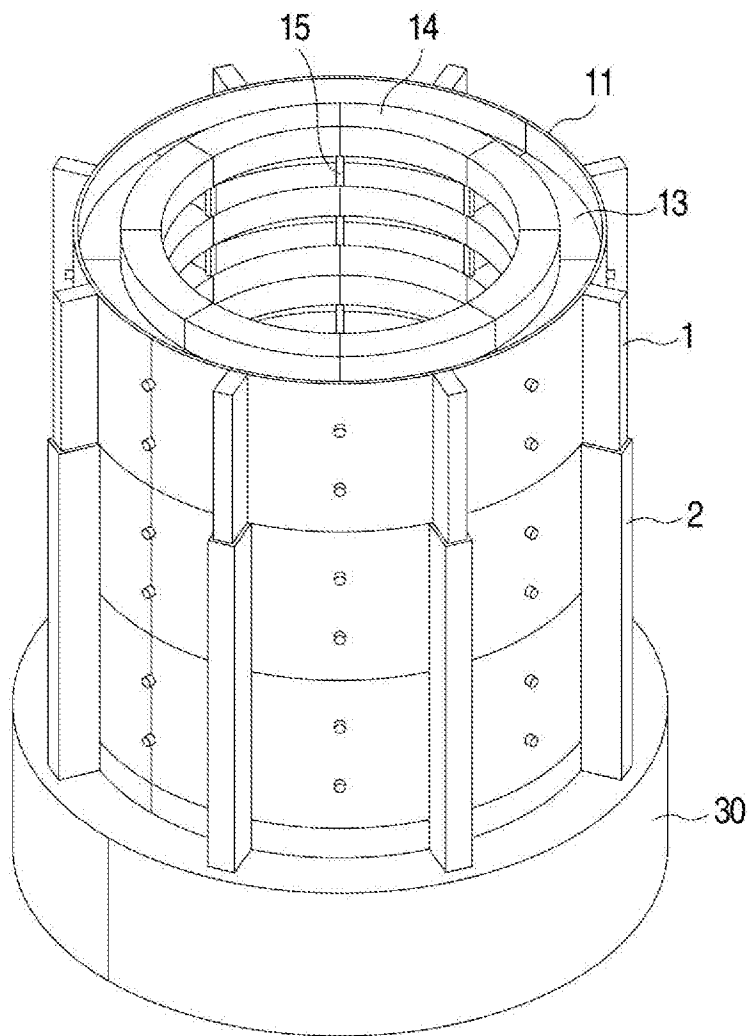
[図10]



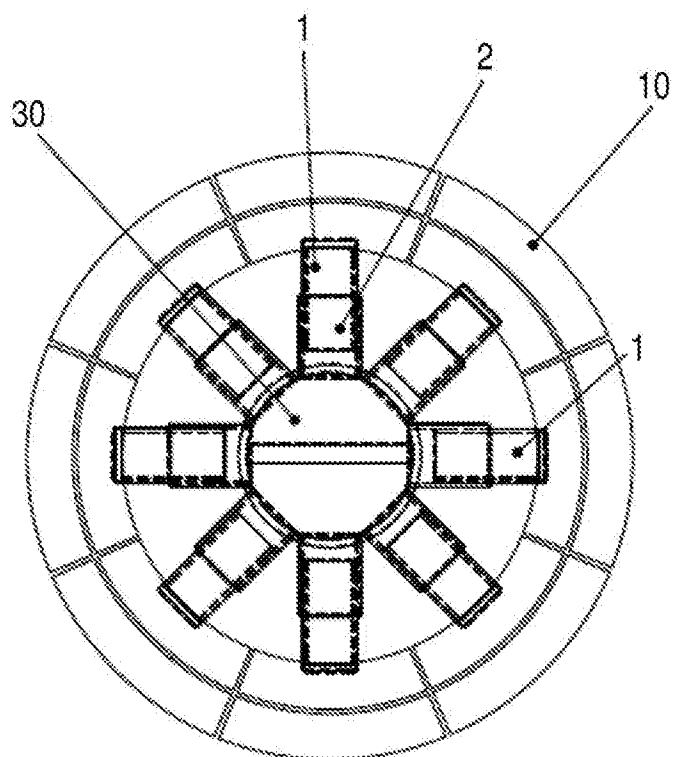
[図11A]



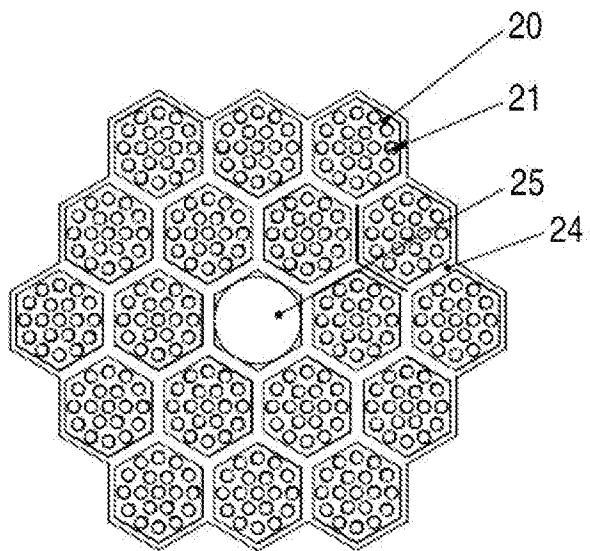
[図11B]



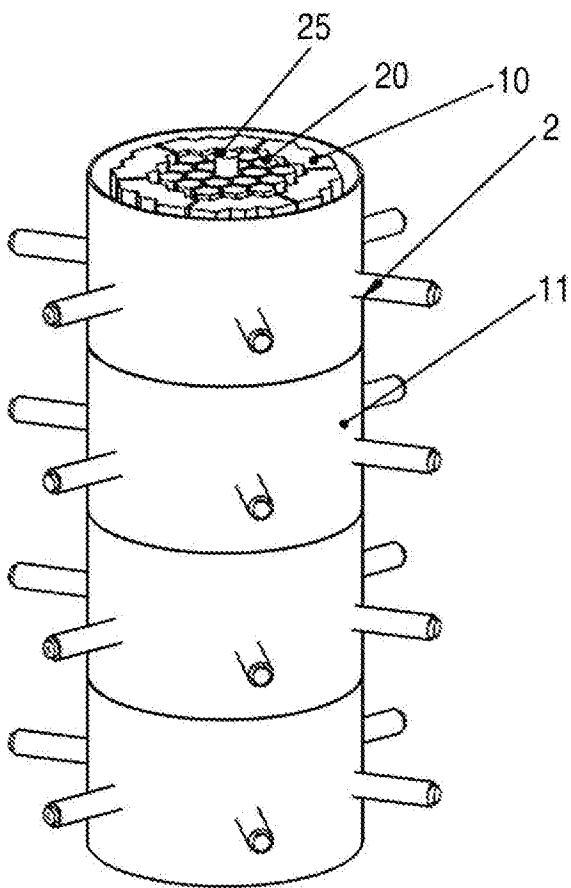
[図12]



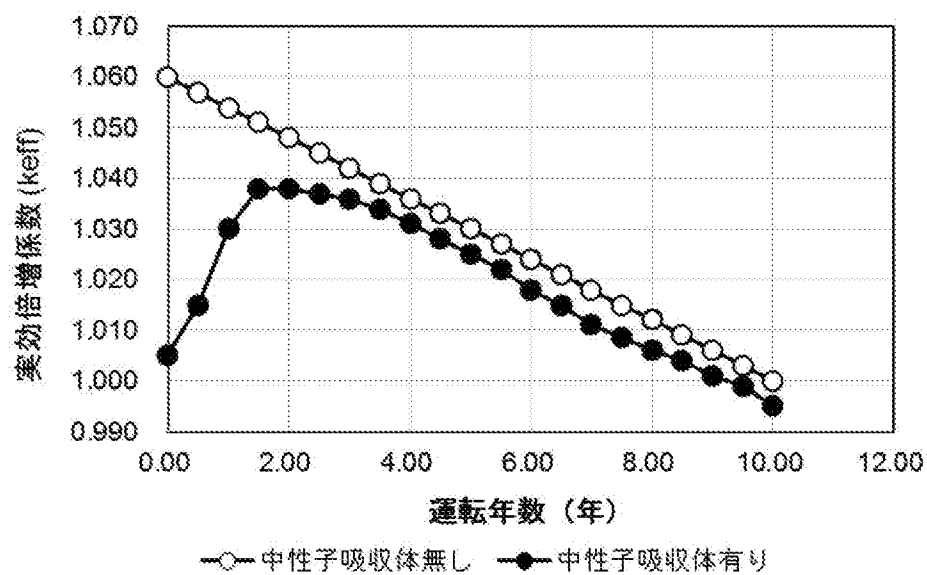
[図13]



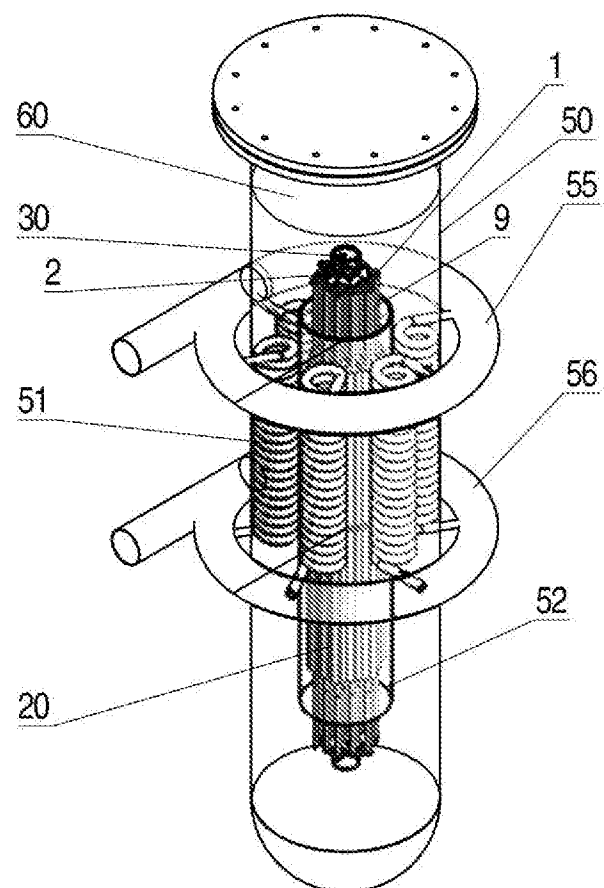
[図14]



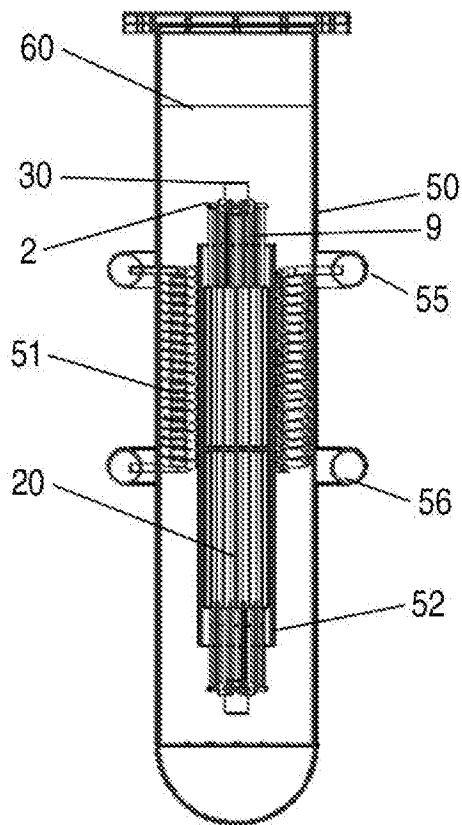
[図15]



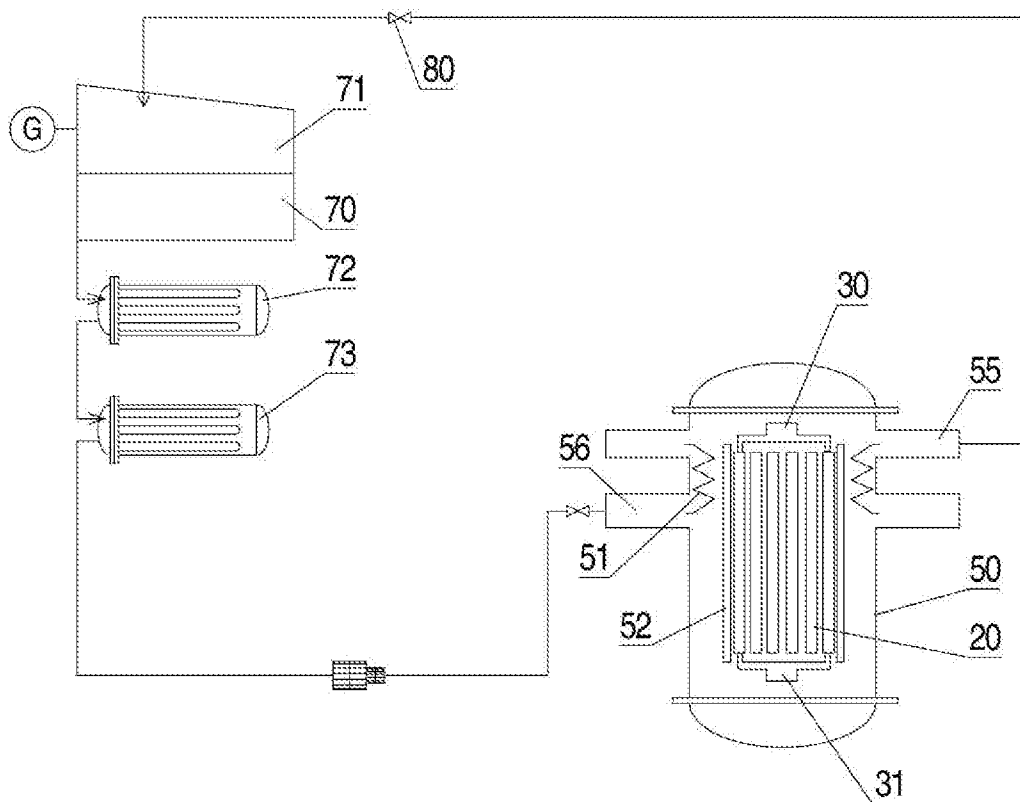
[図16A]



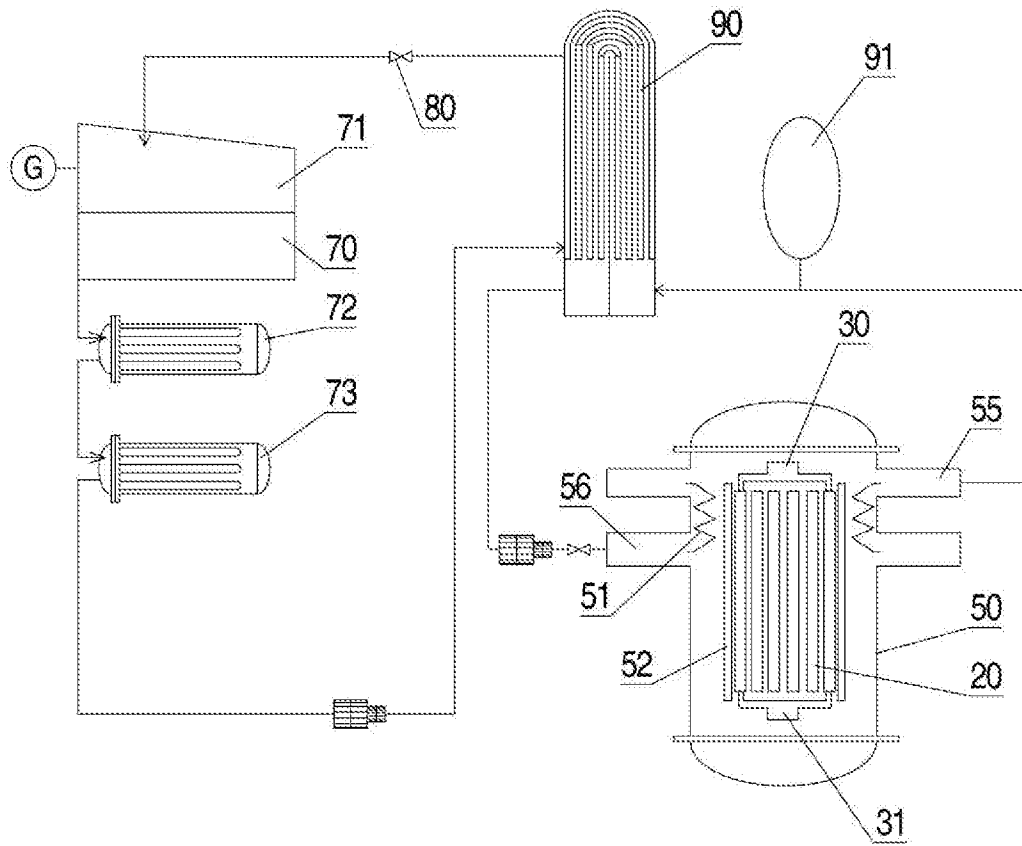
[図16B]



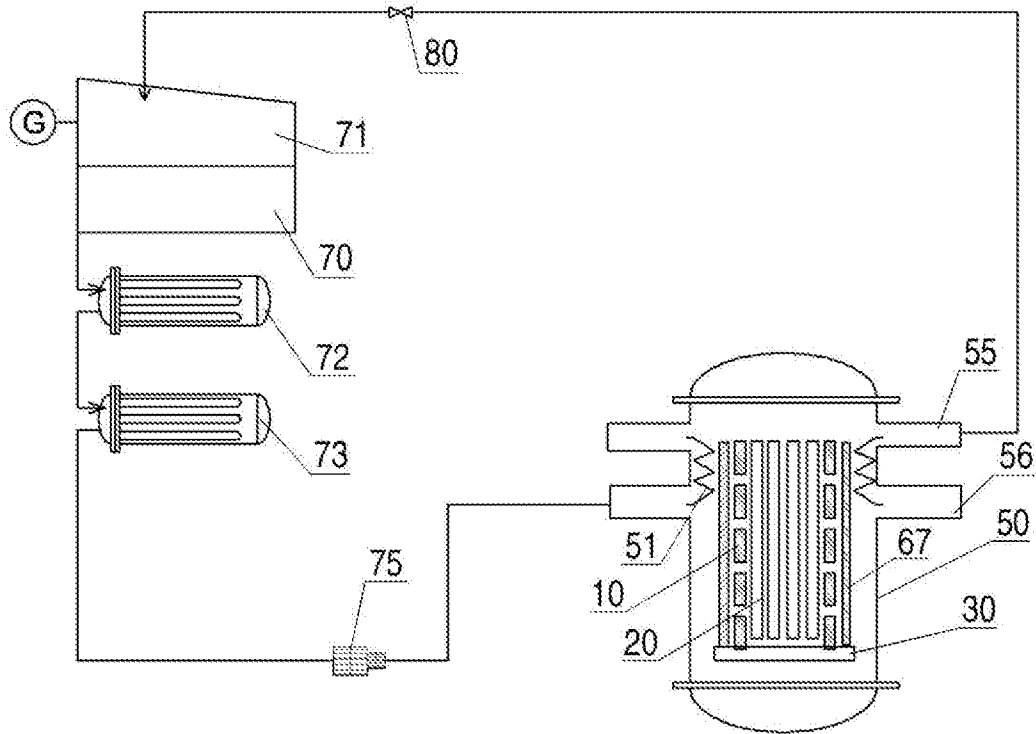
[図17]



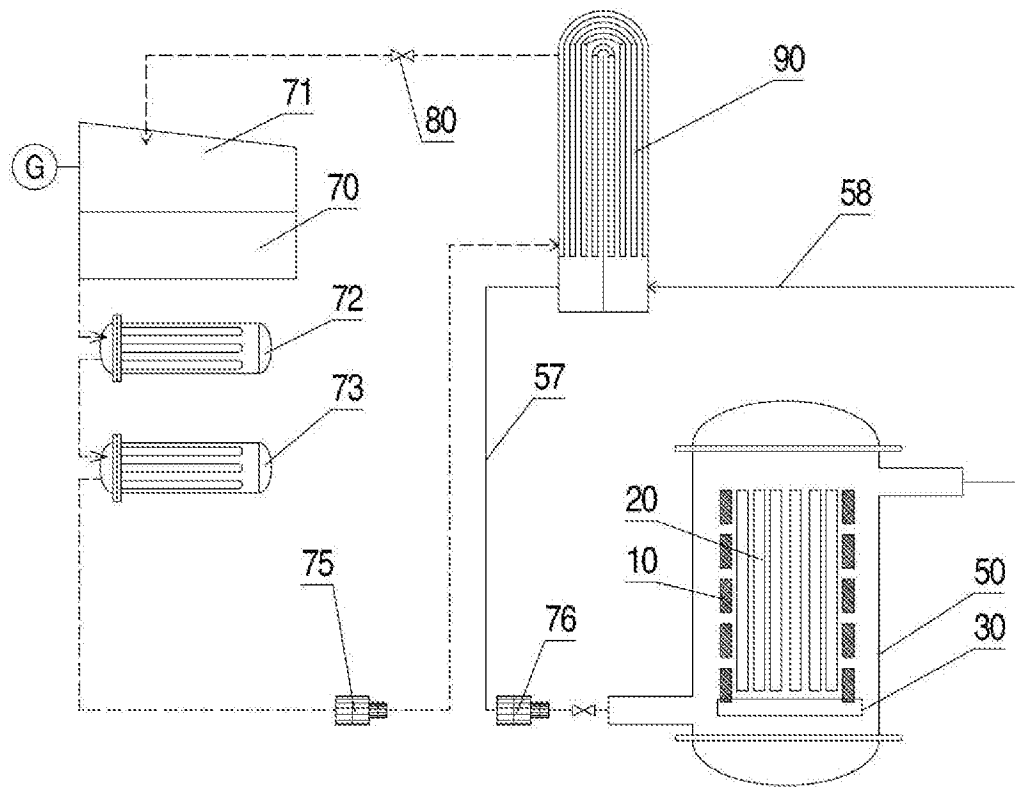
[図18]



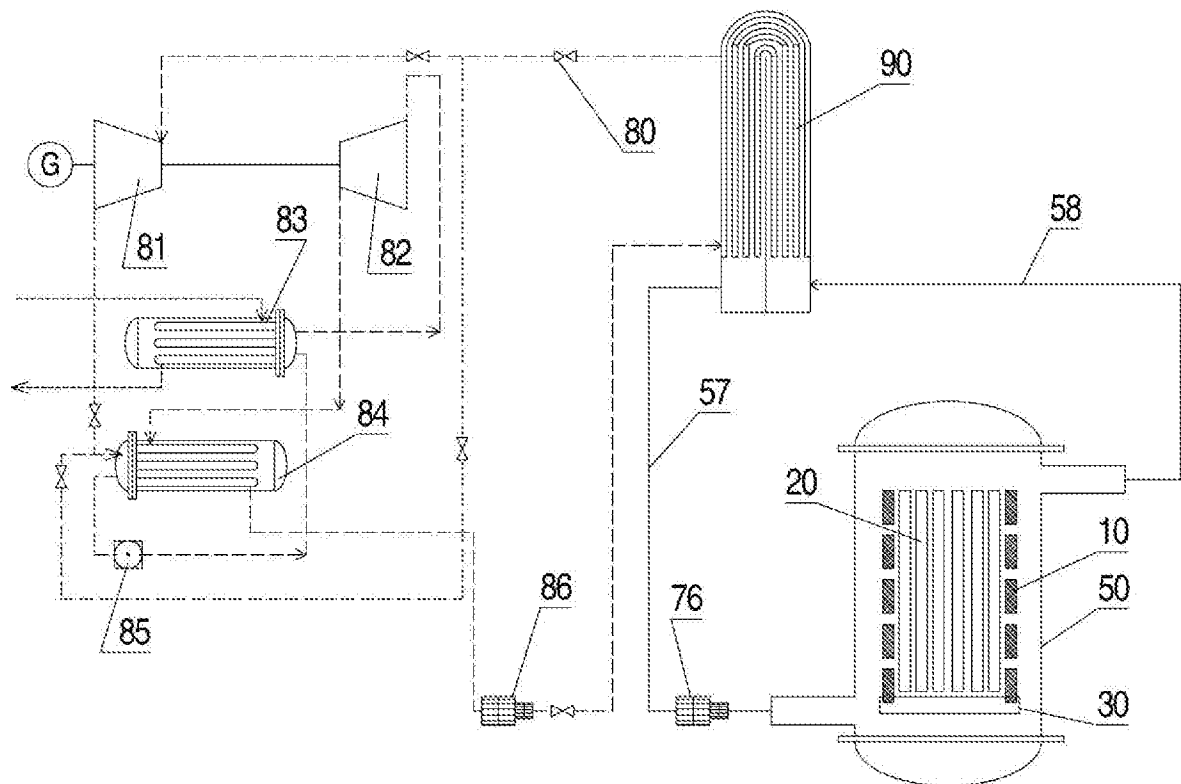
[図19]



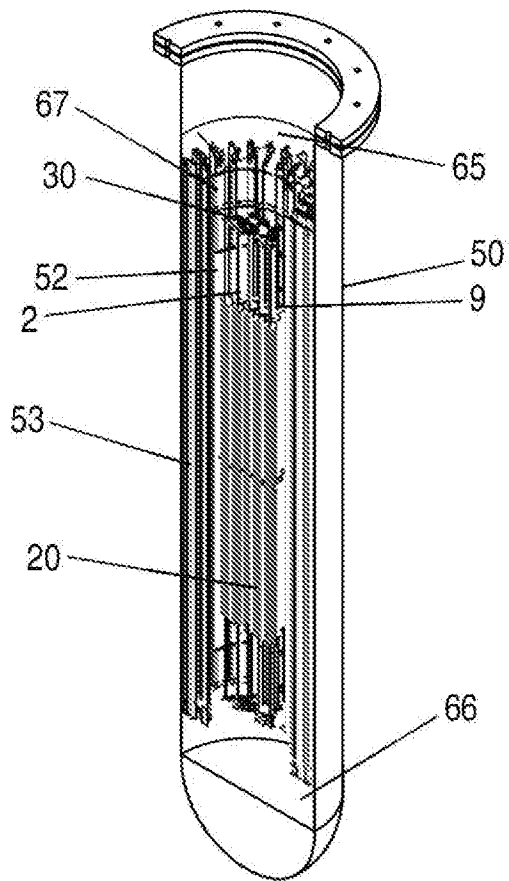
[図20]



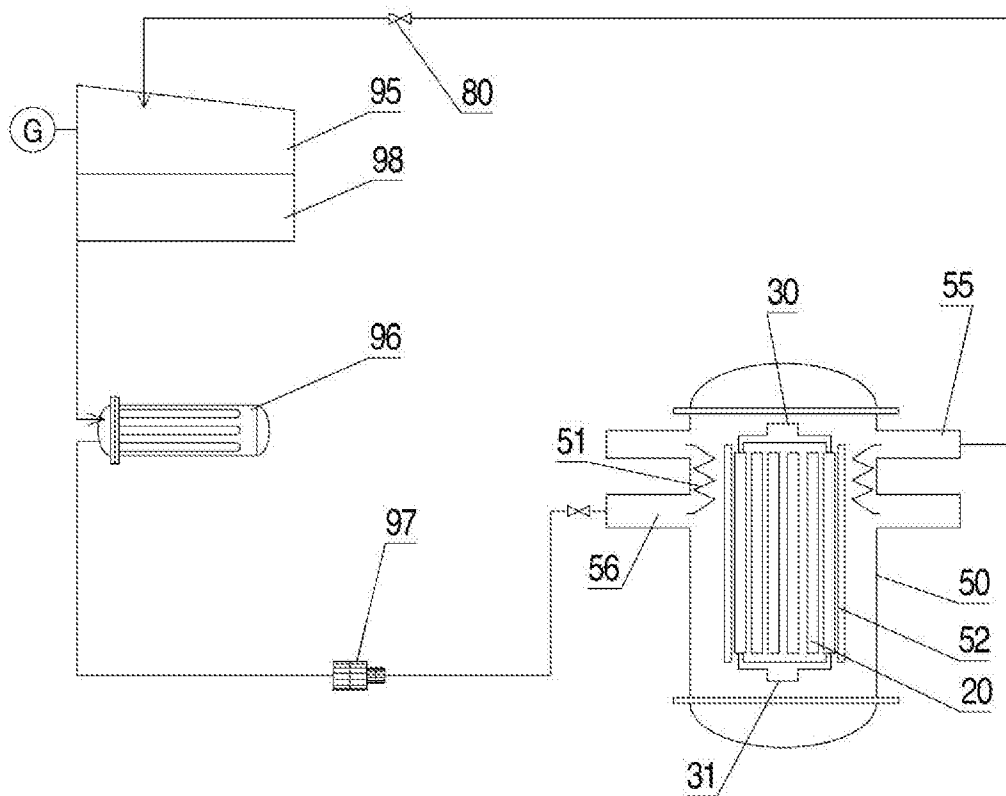
[図21]



[図22]



[図23]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/016426

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G21C1/02(2006.01)i, G21C7/02(2006.01)i, G21C7/28(2006.01)i, G21C7/30(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G21C1/02, G21C7/02, G21C7/28, G21C7/30

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2017	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2017

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 8-15473 A (Toshiba Corp.), 19 January 1996 (19.01.1996), fig. 1 to 2; paragraphs [0027] to [0041] (Family: none)	1-26
A	JP 1-101497 A (Nippon Atomic Industry Group Co., Ltd.), 19 April 1989 (19.04.1989), page 3, lower left column, line 11 to page 3, lower right column, line 18 (Family: none)	1-26

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
18 July 2017 (18.07.17)

Date of mailing of the international search report
01 August 2017 (01.08.17)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/016426

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2013/094196 A1 (Nihon Nature Cell Co., Ltd.), 27 June 2013 (27.06.2013), paragraph [0065] & US 2015/0049850 A1 paragraph [0065]	1-26

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G21C1/02(2006.01)i, G21C7/02(2006.01)i, G21C7/28(2006.01)i, G21C7/30(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G21C1/02, G21C7/02, G21C7/28, G21C7/30

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 8-15473 A (株式会社東芝) 1996.01.19, 第1-2図、第[0027]-[0041]段落 (ファミリーなし)	1-26
A	JP 1-101497 A (日本原子力事業株式会社) 1989.04.19, 第3頁左下欄第11行-第3頁右下欄第18行 (ファミリーなし)	1-26

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの	「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの	「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)	「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献	「&」 同一パテントファミリー文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願	

国際調査を完了した日

18.07.2017

国際調査報告の発送日

01.08.2017

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

長谷川 聡一郎

2 G

5552

電話番号 03-3581-1101 内線 3226

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	WO 2013/094196 A1 (日本ネイチャーセル株式会社) 2013.06.27, 第 [0 0 6 5] 段落 & US 2015/0049850 A1, 第 [0 0 6 5] 段落	1-26