

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6343021号  
(P6343021)

(45) 発行日 平成30年6月13日(2018.6.13)

(24) 登録日 平成30年5月25日(2018.5.25)

(51) Int.Cl.

F 1

G 2 1 C 17/02 (2006.01)  
G 2 1 D 1/00 (2006.01)G 2 1 C 17/02  
G 2 1 D 1/00

F

W

請求項の数 12 (全 9 頁)

(21) 出願番号 特願2016-553201 (P2016-553201)  
 (86) (22) 出願日 平成26年5月8日 (2014.5.8)  
 (65) 公表番号 特表2016-535285 (P2016-535285A)  
 (43) 公表日 平成28年11月10日 (2016.11.10)  
 (86) 國際出願番号 PCT/RU2014/000331  
 (87) 國際公開番号 WO2015/072886  
 (87) 國際公開日 平成27年5月21日 (2015.5.21)  
 審査請求日 平成28年5月16日 (2016.5.16)  
 (31) 優先権主張番号 2013150258  
 (32) 優先日 平成25年11月12日 (2013.11.12)  
 (33) 優先権主張国 ロシア(RU)

(73) 特許権者 515142237  
 ジョイント ストック カンパニー “アク  
 メエンジニアリング”  
 ロシア連邦, 1 1 5 0 3 5 モスクワ, ピ  
 ャトニツカヤ ウーリツア 13, ストラ  
 イエニエ 1  
 (74) 代理人 100130111  
 弁理士 新保 齊  
 (72) 発明者 アスカデュリン, ラドミール シャミーリ  
 ヴィッチ  
 ロシア連邦, 2 4 9 0 3 0, ジー. オブニ  
 ンスク, カルーシスカヤ オービーエル.  
 , プル. マルクサ, 73, ケーヴィー. 5  
 2

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】液体金属冷却原子炉、そのような原子炉内の酸素熱力学的活性を監視するシステム、及び酸素熱力学的活性を監視する方法

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

液体金属冷却材を用いる原子炉であって、前記原子炉は、前記液体金属冷却材レベルより下にある炉心を有する圧力容器、蒸気発生器、循環ポンプ、及び前記原子炉内に位置し測定ユニットに接続された制御要素を収容する液体金属冷却材状態監視システムを備え、前記制御要素は、前記圧力容器の中心及び周縁に位置し前記液体金属冷却材層内に酸素濃度を測定する感知素子を有する酸素熱力学的活性センサ、並びに前記液体金属冷却材レベルの上に位置し前記冷却材中に周期的に浸漬可能であるように設計され、酸素濃度を測定する感知素子を有する更なる酸素熱力学的活性センサを含む、原子炉。

## 【請求項 2】

少なくとも 2 つの前記酸素熱力学的活性センサが据え付けられ、前記酸素熱力学的活性センサの前記感知素子は、前記液体金属冷却材層内にある、請求項 1 に記載の原子炉。

## 【請求項 3】

前記液体金属冷却材レベルの上に位置する前記更なる酸素熱力学的活性センサは、垂直移動デバイスを備える、請求項 1 に記載の原子炉。

## 【請求項 4】

前記更なる酸素熱力学的活性センサは、前記圧力容器の中心部に位置する、請求項 1 に記載の原子炉。

## 【請求項 5】

固体電解質を前記酸素熱力学的活性センサとして使用する、請求項 1 に記載の原子炉。

10

20

**【請求項 6】**

請求項 1 に記載の前記原子炉内に配置して用いられ、測定ユニットに接続された制御要素を収容する原子炉液体金属冷却材状態監視システムであって、前記制御要素は、前記圧力容器の中心及び周縁に位置する酸素熱力学的活性センサ、前記液体金属冷却材層内に位置する酸素濃度を測定する感知素子、及び前記液体金属冷却材レベルの上に位置し前記液体金属冷却材中に周期的に浸漬可能であるように設計され、酸素濃度を測定する感知素子を有する更なる酸素熱力学的活性センサを含む、原子炉液体金属冷却材状態監視システム。

**【請求項 7】**

少なくとも 2 つの前記酸素熱力学的活性センサが据え付けられ、前記酸素熱力学的活性センサの前記感知素子は、前記液体金属冷却材層内にある、請求項 6 に記載の原子炉液体金属冷却材状態監視システム。 10

**【請求項 8】**

前記液体金属冷却材レベルの上に位置する前記更なる酸素熱力学的活性センサは、垂直移動デバイスを備える、請求項 6 に記載の原子炉液体金属冷却材状態監視システム。

**【請求項 9】**

前記更なる酸素熱力学的活性センサは、前記圧力容器の中心部に位置する、請求項 6 に記載の原子炉液体金属冷却材状態監視システム。

**【請求項 10】**

固体電解質を前記酸素熱力学的活性センサとして使用する、請求項 6 に記載の原子炉液体金属冷却材状態監視システム。 20

**【請求項 11】**

請求項 1 に記載の液体金属冷却材を用いる原子炉内の酸素熱力学的活性を監視する方法であって、前記液体金属冷却材中の酸素熱力学的活性を測定すること、及び前記測定ユニットに読み取り値を送ることによる、方法であり、前記測定は、前記圧力容器の「高温」中心部分及び「常温」周縁部分で連続的に実施され、前記酸素熱力学的活性は、前記原子炉「高温」中心部分で断続的に更に測定される、方法。

**【請求項 12】**

前記酸素熱力学的活性の更なる測定は、前記原子炉の前記中心部分で 1 ヶ月に 1 又は 2 回実施される、請求項 11 に記載の監視方法。 30

**【発明の詳細な説明】****【技術分野】****【0001】**

本発明は、原子力に関し、主要回路内で鉛含有液体金属冷却材を用いる発電プラント内、特に重液体金属冷却材 (HLMC)、即ち 44.5% Pb - 55.5% Bi 共晶合金及び鉛、をそれぞれ用いる高速中性子原子炉内で使用できる。

**【背景技術】****【0002】**

HLMC に固有の特徴は、構造材料に対するかなり高い腐食性である。

**【0003】**

これに関連して、使用の際に現れる鉛含有液体金属冷却材技術の主な目的は：

- 鉛含有液体金属冷却材と接触して使用される構造材料の耐食性を保証し；

- 冷却材及び循環ループ機器の内部面の両方に必要な純度をもたらす（プラントの個々の区分へのスラッギングを防止するため）

ことである。

**【0004】**

HLMC 中に溶存する酸素濃度は、HLMC と接触して動作する機器及びパイプラインの表面の腐食挙動に著しく影響を与える。

**【0005】**

鉄及びクロムと比較するとより低い、鉛及びビスマスの酸素親和性のために、基体への

50

良好な接着性を有するかなり薄い(1~10 μm)高密度酸化膜が、溶存酸素を含有する鉛又は鉛-ビスマス溶融物と接触する鋼鉄面上に形成される。そのような膜が存在すると、構造材料の耐食性は大幅に増大する。

#### 【0006】

したがって、現在、HLMCと接触する構造材料を保護する主な方法は、表面の酸素不活性化(阻害)であり、こうして材料面上に酸化物膜を形成し、材料面を維持することにある。

#### 【0007】

酸化物膜の性質のために、プラントの動作中、膜の状態は、冷却材中の酸素熱力学的活性のレベルによって大きく決定される。

10

#### 【0008】

冷却材(鉛-ビスマス、鉛)中の溶存酸素の濃度が臨界値を下回ると、構造鋼鉄に対する確実な腐食保護がもたらされない。

#### 【0009】

一方で、冷却材中に相当量の酸素があると望ましくない。というのは、相当量の酸素は、冷却材中に固相酸化物の容認できない蓄積をもたらすためである。

#### 【0010】

この全てにより、全ての設計動作モードにおいて、冷却材中の設定酸素熱力学的活性の連続的な監視、維持を必要とする。

#### 【0011】

液体金属冷却材を用いる原子炉を備える原子力発電プラントが公知であり、この原子炉は、冷却材レベルより下にある炉心、蒸気発生器、循環ポンプ、及び酸素熱力学的活性を定期的に測定することによって液体金属冷却材状態を監視するシステムを有し、このシステムは、冷却材中に浸漬し、容器内の測定ユニットに接続した単一の制御要素を有する。

[P. N. Martynov, R. Sh. Askhadullin, A. A. Simakov等。「Development of an Automated System of Monitoring, Forecasting and Control of the State of the Lead-Bismuth (Lead) Coolant and Surfaces of the Nuclear Power Plant Circuit(原子力発電プラント回路の鉛-ビスマス(鉛)冷却材状態及び表面を監視、予測、制御する自動システムの開発)」、第3回学際的科学・実務会議「Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies(原子力技術における重液体金属冷却材)」の報告書、Obninsk。2008年9月15~19日、全2巻。Obninsk: RF SSC-I PPE、2010年、第1巻128~136頁] (非特許文献1)。

20

#### 【0012】

しかし、これらの知見は、常に事実に基づくわけではない。というのは、様々な工程条件下、原子力プラント回路部品の「常温」部分では、スラッギング及び酸化物相の結晶化がもたらされ、原子力プラント回路部品の「高温」区分では、構造材料内面上の保護酸化物コーティングの破損が生じるが、上記知見は、そうした工程条件下における回路の様々な部品の酸素熱力学的活性の真値を提供していないためである。

30

#### 【0013】

したがって、循環液体金属冷却材を用いる原子力プラントの確実で安全な動作に関して、冷却材中の酸素熱力学的活性を一定レベルで維持する必要、したがってこのパラメータの確実で正確な監視を実現する必要がある。

40

#### 【0014】

更に、原子力プラント全体の動作モードを変更させること(出力、冷却材流量の変更)によって、温度の関数として酸素熱力学的活性に関する情報を適時に得ることが慣例であるが、このことは非常に望ましくないことである。

#### 【先行技術文献】

50

**【非特許文献】****【0015】**

【非特許文献1】P . N . Martynov、R . Sh . Askhadullin、A . A . Simakov等。「Development of an Automated System of Monitoring, Forecasting and Control of the State of the Lead-Bismuth (Lead) Coolant and Surfaces of the Nuclear Power Plant Circuit (原子力発電プラント回路の鉛-ビスマス(鉛)冷却材状態及び表面を監視、予測、制御する自動システムの開発)」、第3回学際的科学・実務会議「Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies (原子力技術における重液体金属冷却材)」の報告書、Obninsk。2008年9月15~19日、全2巻。Obninsk : R F SSC - IPPE、2010年、第1巻128~136頁]」10

**【発明の概要】****【発明が解決しようとする課題】****【0016】**

本発明の技術的目的は、液体金属冷却材中の設定酸素熱力学的活性の確実な監視を保証し、原子力プラントのあらゆる設計動作条件下で、この活性を維持することである。20

**【0017】**

本発明の技術的結果は、原子炉流路内の液体金属冷却材の物理的、化学的工程に関する情報を連続的且つ確実に得ることによる、原子炉動作の信頼性の向上である。20

**【課題を解決するための手段】****【0018】**

上記の結果は、液体金属冷却材を用いる原子炉の創出によって達成され、この原子炉は、冷却材レベルより下にある炉心を有する容器、蒸気発生器、循環ポンプ、及び原子炉内に位置し測定ユニットに接続した制御要素を収容する液体金属冷却材状態監視システムを備え、システム制御要素は、原子炉圧力容器の中心及び周縁に位置し液体金属冷却材層内に感知素子を有する酸素熱力学的活性センサ、並びに液体金属冷却材レベルの上に位置し冷却材中に周期的に浸漬可能であるように設計した更なる酸素熱力学的活性センサを含む。30

**【0019】**

酸素熱力学的活性センサの数は、変更できる。センサの数を増やすと、測定の正確さが向上する。しかし、センサの据付けは、原子炉容器の統合性を損なうことに関連するので、少なくとも2つの酸素熱力学的活性センサを据え付け、酸素熱力学的活性センサの感知素子は、液体金属冷却材層内にあることが好ましい。センサのうち1つは、冷却材が炉心から出る原子炉容器の「高温」中心部分内にあり、2つ目は、容器の「常温」周縁部分にある。

**【0020】**

冷却材レベルの上に位置する更なる酸素熱力学的活性センサは、断続的に動作するため、このセンサは、このセンサの感知素子を冷却材層内に浸漬させる垂直移動デバイスを備える。40

**【0021】**

更なる酸素熱力学的活性センサは、原子炉容器中心部分の冷却材レベルの上に位置することになるのが好ましい。

**【0022】**

好ましくは、固体電解質を、酸素熱力学的活性センサとして使用する。

**【0023】**

本発明の技術的結果は、原子炉液体金属冷却材状態監視システムの創出によって達成され、このシステムは、原子炉内に位置し測定ユニットに接続した制御要素を収容し、制御50

要素は、原子炉圧力容器の中心及び周縁に位置し液体金属冷却材層内に感知素子を有する酸素熱力学的活性センサ、並びに液体金属冷却材レベルの上に位置し冷却材中に周期的に浸漬可能であるように設計した更なる酸素熱力学的活性センサを含む。

**【0024】**

少なくとも2つの酸素熱力学的活性センサが据え付けられ、酸素熱力学的活性センサの感知素子は、液体金属冷却材層内にあることが好ましい。

**【0025】**

冷却材レベルの上に位置する更なる酸素熱力学的活性センサは、垂直移動デバイスを備えることが好ましい。

**【0026】**

更なる酸素熱力学的活性センサは、原子炉容器中心部分の冷却材レベルの上に位置することになることも好ましい。

**【0027】**

好ましくは、固体電解質を、酸素熱力学的活性センサとして使用する。

**【0028】**

センサは、350～650のPb又はPb-Bi溶融物による激しい影響、最大1.5 MPaの圧力、最大100/秒の熱衝撃、及び最大1.0 m/秒の冷却材速度という条件下で、確実に動作するものとする。

**【0029】**

したがって、本発明で使用される酸素熱力学的活性センサの動作は、固体酸化物電解質ベースのガルバニ濃淡電池を用いる電気化学方法に基づく。そのようなセンサは公知であり、電力工学分野では様々な物質中の酸素含量の決定に適用し、化学及び自動車産業ではガス中の酸素の監視に適用し、冶金及び半導体技術では金属溶融物中の酸素の監視に適用する。

**【0030】**

本出願人は、請求項1に記載の液体金属冷却材を用いる原子炉内の酸素熱力学的活性を監視する方法も保護し、この方法は、冷却材中の酸素熱力学的活性を測定すること、及び測定ユニットに読み取り値を送ることによる、方法であり、測定は、原子炉容器の「高温」中心部分及び「常温」周縁部分で連続的に実施され、酸素熱力学的活性は、原子炉の「高温」中心部分で断続的に更に測定される。

**【0031】**

酸素熱力学的活性の更なる測定は、原子炉の中心部分で1ヶ月に1又は2回実施される。

**【0032】**

本発明を図面によって例示する。

**【図面の簡単な説明】**

**【0033】**

【図1】液体金属冷却材中の酸素熱力学的活性を監視するシステムを有する原子炉の図である。

【図2】B M - 40 A 及びOK - 550 プラント内の鉛 - ビスマス冷却材温度に対する酸素熱力学的活性センサ(OAS)読み取り値の依存性を示すグラフである。

**【発明を実施するための形態】**

**【0034】**

液体金属冷却材を用いる原子炉は、冷却材レベルより下にある炉心2を有する容器1を有し、センサ通路4を有する遮蔽プラグ3は、炉心の上に位置する。原子炉容器1は、蒸気発生器5及び循環ポンプ6も収容する。保護ガスは、原子炉容器1の上側部に位置する。

**【0035】**

冷却材中の酸素熱力学的活性を監視するシステムは、感知素子8を備える常置式酸素熱力学的活性センサ7を備え、感知素子8は、遮蔽プラグ3の通路4において、原子炉容器

10

20

30

40

50

1の「高温」中心部の液体金属冷却材層に位置する。センサ7は、共通の測定ユニットに接続される(図では省略する)。

**【0036】**

監視システムの酸素熱力学的活性センサ9は、原子炉容器1の「常温」周辺部の液体金属冷却材層に位置する感知素子10を有する。センサ9は、共通の測定ユニットに接続される(図では省略する)。

**【0037】**

監視システムの更なる酸素熱力学的活性センサ11は、液体金属冷却材レベルの上に位置し、この目的に適した任意の設計をもつ垂直移動デバイス13の使用によって、センサ11の感知素子12が冷却材レベルの下に周期的に移動可能であるように設計されている。センサ11も、共通の測定ユニットに接続される(図では省略する)。

10

**【0038】**

更なるセンサ11による酸素熱力学的活性の測定頻度は、状況に応じて実験により決定され、平均では1ヶ月に2回である。

**【0039】**

酸素熱力学的活性監視システムを有する原子炉は、以下のように動作し、監視方法は以下のように実施される。

**【0040】**

炉心2内で加熱され溶融した冷却材は、ポンプ6により生成した圧力下、蒸気発生器5に供給し、炉心の熱を水蒸気に移動させる。原子炉の動作中、反応容器1の「高温」及び「常温」領域内の酸素熱力学的活性の数値は、酸素熱力学的活性センサ7及び9を使用して決定する。測定値は、单一の測定ユニットに送信する。次に、酸素熱力学的活性の温度依存性を決定し、表形式の値と比較し、これにより、液体金属冷却材の状態、例えば構造鋼鉄との相互作用により冷却材中に不純物が存在すること、に関する結論を出すことを可能にする。

20

**【0041】**

測定したパラメータが設定値からずれている場合、冷却材中に溶存する酸素濃度は、冷却材成分酸化物を溶解させることによって維持され、この冷却材成分酸化物は、回路内に事前に供給されるか、又は冷却材から結晶化させ、フィルタ上に蓄積されることによって生成する。

30

**【0042】**

したがって、全ての設計動作モードにおいて、冷却材中の設定酸素熱力学的活性を連続的に監視し、維持することが実施される。

**【0043】**

既に上記したように、プラントの動作中、冷却材中の酸素熱力学的活性は、一方で、構造材料面上の酸素不活性化膜を保護する範囲、即ち耐食性範囲、及び他方で、非等温回路の全ての部品の原子炉回路要素の内側面上にスラグを堆積させない範囲内にあるべきである。

**【0044】**

循環回路で液体金属冷却材を用いる原子炉を長期間動作させる際、冷却材中に溶存する酸素は、連続的に消費され、構造材料成分中の不純物と結合し、冷却材の成分と比較すると酸素親和性がより高い溶融物(鉄、クロム)の中に拡散する。

40

**【0045】**

これにより、溶存酸素濃度は、保護酸化物コーティングが劣化し始める値まで低下し、このことは、腐食の急激な増加を意味する。したがって、液体金属冷却材を用いる循環回路の動作の質を表す最も重要なパラメータの1つは、溶融物中に溶存する酸素の熱力学的活性であり、連続的に監視すべきである。

**【0046】**

本発明によれば、パラメータ・センサの故障、又は故障が疑われる時、測定は、酸素熱力学的活性センサ11(監視及びバックアップ機能を有する)によって実施する。測定は

50

、断続的、例えば1か月に1から2回実施して、測定値をセンサ7及び9の読み取り値と比較するか、又はセンサ7及び9が故障した場合に酸素熱力学的活性を測定できるようにする。

#### 【0047】

したがって、原子炉動作の信頼性、及び原子炉流路内の物理工程及び化学工程に関し得られた情報の正確さが増大する。原子炉圧力容器の「高温」及び「常温」部分内に常置式酸素熱力学的活性センサを据え付け、断続的に動作する更なる酸素熱力学的活性センサが利用可能であることで、通常の原子炉動作モードを変更せず、リアルタイムにデータ入手することが可能にもなる。

#### 【0048】

本発明を適用すると、液体金属冷却材を用いる原子炉鋼鉄循環回路の有効寿命を拡大し、スラグの堆積をなくし、回路内に施したフィルタ・ユニットの効率の向上を可能にする。

#### 【0049】

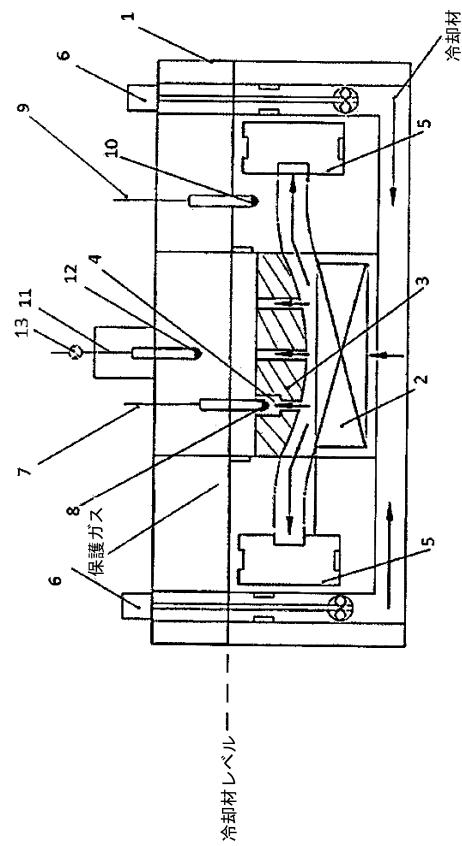
鉛-ビスマス冷却材の温度に対する、酸素熱力学的活性センサ(OAS)の読み取り値の依存性を示す図2のグラフは、本明細書に対する例示として、異なる原子力プラントの鉛-ビスマス循環回路内の酸素熱力学的活性の特定の読み取り値を示す。

#### 【符号の説明】

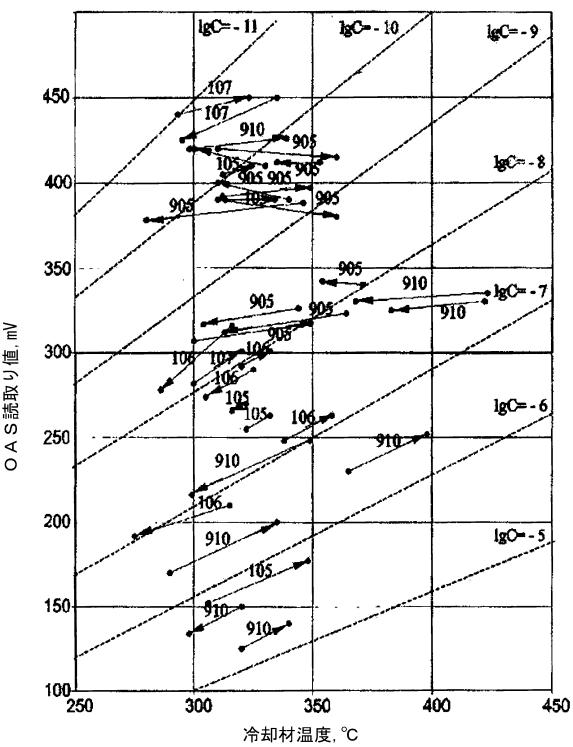
#### 【0050】

- |    |                |    |
|----|----------------|----|
| 1  | 容器             | 20 |
| 2  | 炉心             |    |
| 3  | 遮蔽プラグ          |    |
| 4  | センサ通路          |    |
| 5  | 蒸気発生器          |    |
| 6  | 循環ポンプ          |    |
| 7  | 酸素熱力学的活性センサ    |    |
| 8  | 感知素子           |    |
| 9  | 酸素熱力学的活性センサ    |    |
| 10 | 感知素子           |    |
| 11 | 更なる酸素熱力学的活性センサ | 30 |
| 12 | 感知素子           |    |
| 13 | 垂直移動デバイス       |    |

【 図 1 】



【図2】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 イワノフ, コンスタンチン ドミトリエヴィッヂ  
ロシア連邦, 249030, ジー. オブニンスク, カルーシスカヤ オービーエル., ウル. ツヴ  
ェツドナヤ, 13, ケーヴィー. 71
- (72)発明者 マルティノフ, ピョートル ニキフォロヴィッヂ  
ロシア連邦, 249030, ジー. オブニンスク, カルーシスカヤ オービーエル., プル. レニ  
ーナ, 130, ケーヴィー. 11
- (72)発明者 ストロチェンコ, アレクセイ ニコラエヴィッヂ  
ロシア連邦, 249030, ジー. オブニンスク, カルーシスカヤ オービーエル., プル. レニ  
ーナ, 222, ケーヴィー. 27

審査官 藤原 伸二

- (56)参考文献 特開2003-294885(JP, A)  
特開2005-227136(JP, A)  
特開昭57-157192(JP, A)  
特開2003-075401(JP, A)  
特開2001-264476(JP, A)  
特表2009-509154(JP, A)  
特開2003-279398(JP, A)  
特開昭53-067095(JP, A)  
米国特許出願公開第2013/0205869(US, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 21 C 17/02 - 17/038  
G 21 D 1/00 - 1/02  
G 21 D 3/08  
G 21 C 19/30 - 19/313