

分置

深海調査用高速炉システムの重量検討 追加計算

1 9 9 1 年 9 月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

深海調査用高速炉システムの重量検討

追加計算

大坪 章¹⁾、羽賀一男¹⁾

要 旨

1991年5月に纏めた動燃報告書 PNC ZN9410 91-176”深海調査用高速炉システムの重量検討”の追加計算を行った。

上記報告書では、無人基地用動力源（水深8020mを想定、10kWe）及び1万m級潜水調査船用動力源（20kWe）について、高速炉システムの耐圧殻込みの重量を試算した。本報告書ではその後得られた知識を用いて追加計算を行った。追加計算の主な内容は次の通りである。

1. 水深を固定せずに変数として、重量と水深の関係式を求めた。
2. この動力源を深海調査用に用いるときは、海水中での重量を0とするため浮力材を取りつける事になるが、この浮力材についても重量を求めた。
3. 上記報告書では、無人基地用動力源（10kWe）の発電方式を、1.3kWeの密閉ブレイトンサイクル8台使用するとしたが、本報告書では5kWeのものを2台使用するように変更した。

追加計算の結果では、水深1万mの場合浮力材込みの総重量は、10kWeのときは約13.6トン、20kWeのときは約13.9トンとなった。

1) 大洗工学センター、技術開発部、フロンティア技術開発室

Additional Calculation on Weight of Fast Reactor System for Deep Sea Research

Akira Otsubo * , Kazuo Haga *

Abstract

Additional calculation was performed concerning "Study of Weight of Fast Reactor Power System for Deep Sea Research" (PNC ZN9410 91-176) published in 1991.

In the above report, weight was calculated of power systems of 10kWe for an unmanned base located at the depth of water of 8,020m and of 20kWe for a research submersible diving to that of 10km. The power systems consisted of fast reactor systems and pressure hulls.

The main points of the additional calculation were as follows.

1. The depth of water was not fixed, but treated as a parameter.
2. When the power systems will be used in future, some buoyancy material will be attached to the systems in order to make the weight of the systems zero in the sea water. The weight of the buoyancy material was also calculated in this report.
3. In the case of 10kWe power source, electric power was generated by eight sets of closed Brayton cycles of 1.3kWe, but two sets of 5kWe were used in this report.

* Frontier Technology Development Section, Technology Development Division,
O-arai Engineering Center, PNC

The additional calculation lead to the result that the total weight of the power systems at the depth of water containing the buoyancy material were 13.6t and 13.9t for 10kWe and 20kWe respectively.

目 次

1. はじめに	1
2. 10 kWe動力源	2
2.1 計算方法	2
2.2 計算結果	3
3. 20 kWe動力源	5
4. おわりに	7
参考文献	8

図一覧表

図2.1	10kWe 宇宙炉システム概念図(熱電気発電)	9
図2.2	10kWe 宇宙炉本体横縦断面図	10
図2.3	深海調査用動力源システム耐圧殻形状 (10kWe)	11
図2.4	全動力源システム重量と水深の関係 (10kWe)	12
図3.1	深海調査用動力源システム耐圧殻形状 (20kWe)	13
図3.2	全動力源システム重量と水深の関係 (20kWe)	14

1. はじめに

近年”しんかい2000”及び”しんかい6500”が就航し、数々の新しい深海の事実が明らかになりつつある。こういう発見の記事がマスコミに取り上げられるにつれて、深海調査の重要性が広く認識されてきている。

報告者は先に、深海調査用高速炉システムの重量検討を行い、その結果について報告した⁽¹⁾。高速炉を用いた動力源を”しんかい6500”のような母船式潜水調査船に搭載する場合、その重量を軽くすることは重要な課題となる。母船の船尾より潜水調査船を海中に引き下ろすような方式では、”しんかい6500”の空中重量約26 tが、潜水調査船の空中重量の限界と言われている。この重量の限界は潜水調査船を空中に引き上げたときの力の釣り合い、即ち母船の重量と潜水調査船の重量の支点回りの力のモーメントの釣り合いで決まるということである。そして母船の中央に穴を開けてそこから潜水調査船を海中に引き下ろすような方式では、この倍の重量まで可能だということである。従ってこの場合潜水調査船の空中重量は、約50 tまで可能となる訳である。

前報⁽¹⁾では上記のような必要性から、10 kWeと20 kWeの動力源につき、その空中重量の検討を行った。この検討結果に基づいて、海洋科学技術センターの専門家と打合せを行ったところ、動力源だけでなくそれに取り付ける浮力材の重量検討も、重要であるというコメントを頂いた。

上記コメント及びその他の、報告者が最近新たに得た知識を用いて追加計算を行ったのでここに報告する。

2. 10kWe 動力源

2.1 計算方法

深海調査用動力源は、高速炉システムと耐圧殻より構成される。この他に海水中での重量を0とする為に浮力材を取りつける。従って深海調査用動力源の重量は、高速炉システム重量と耐圧殻の重量と浮力材の重量の総和となる。

10kWe 動力源に用いる高速炉には、参考文献(1)同様米国で研究されている宇宙炉システムの高速炉を採用する⁽²⁾。このシステムの概略を図2.1及び図2.2に示す。発電は2次系に密閉ブレイトンサイクルを用いて行う。図2.1及び図2.2に示した高速炉と、密閉ブレイトンサイクルを組み合わせたシステムでは40kWe までの発電が可能である。密閉ブレイトンサイクルとしては、5kWeのものを2台用いる。このシステムの重量は1.35t である。

上記の高速炉システムを設置する耐圧殻の形状を図2.3に示す。耐圧殻の厚さはこの形状と、水深即ち水圧で決定される。耐圧殻の材質は、参考文献(3)と同様に10%Ni 鋼を用いるものとする。耐圧殻の厚さの計算には、参考文献(3)の水深6,500mで直径3mの球形の場合、厚さ73mmという計算結果を基本値として用いる。この基本値に10kWe 動力源が使用される水深及び、図2.3の形状の効果を表す修正係数を掛け合わせて、耐圧殻の厚さを求める。こうして求まった耐圧殻の厚さと、図2.3より求まる耐圧殻表面積より耐圧殻体積を求め、これに10%Ni 鋼の密度 $8t/m^3$ を掛け合わせて、耐圧殻重量を計算する。

次に浮力材の計算方法について説明する。

高速炉システムを内蔵する耐圧殻の体積を Vm^3 、高速炉システムと耐圧殻より構成される深海調査用動力源の重量を Wt 、浮力材の体積を bm^3 、密度を ρ 。(シンクタクチックフォーム 比重 0.54) とする。海水中で浮力材を含む全動力源システムの重量が0となる為には、海水の密度を $1.025t/m^3$ とし、浮力材にシンクタクチックフォームを用いるとすると、次式が成立しなければならない。

$$(V + b) m^3 \times 1.025t/m^3 = Wt + b m^3 \times 0.54t/m^3 \dots \dots \dots (1)$$

この式で W と V が既知であるので、 b が求まる。こうして求まった b の値を(1)式の左辺或いは右辺に代入することによって、全動力源システムの空中重量が計算される。

2. 2 計算結果

図2. 3の耐圧殻形状を用いて、耐圧殻の体積Vと高速炉システムと耐圧殻より構成される深海調査用動力源の重量をWを計算する。この計算をし易いように、図2. 3の耐圧殻を上部の球形部分（添字1で表す）、中央の円筒部分（添字2で表す）、下部の半球形部分（添字3で表す）の3つの部分に分ける。

耐圧殻の体積Vは次のように計算される。

$$V_1 = (4 \pi / 3) \times (1.5/2)^3 = 1.767 \text{m}^3$$

$$V_2 = 1.6 \times \pi \times 0.4^2 = 0.804 \text{m}^3$$

$$V_3 = (2 \pi / 3) \times 0.4^3 = 0.134 \text{m}^3$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = 2.705 \text{m}^3$$

次に耐圧殻材質の重量を計算する。この為まず耐圧殻表面積Sを求める。

$$S_1 = 4 \pi \times (1.5/2)^2 - \pi \times 0.4^2 = 6.566 \text{m}^2$$

$$S_2 = 1.6 \times \pi \times 0.8 = 4.021 \text{m}^2$$

$$S_3 = 2 \pi \times (0.8/2)^2 = 1.005 \text{m}^2$$

耐圧殻の厚さtは、深海調査用動力源の位置を水深d kmとすると、水深6.5 kmで直径3mの球形では厚さ73mmという基本値より、次のように計算される。

$$t_1 = 73 \text{mm} \times (d/6.5) \times (1.5/3.0) = 5.615 \text{ d mm}$$

$$t_2 = 73 \text{mm} \times (d/6.5) \times (0.8/3.0) \times 2 = 5.990 \text{ d mm}$$

$$t_3 = 73 \text{mm} \times (d/6.5) \times (0.8/3.0) = 2.995 \text{ d mm}$$

耐圧殻材質の体積は次のようになる。

$$S_1 t_1 + S_2 t_2 + S_3 t_3 = (6.566 \text{m}^2 \times 5.615 \text{ d mm} + 4.021 \text{m}^2 \times 5.990 \text{ d mm} + 1.005 \text{m}^2 \times 2.995 \text{ d mm}) \times 10^{-3} \text{m/mm} = 0.06396 \text{ dm}^3$$

耐圧殻重量は耐圧殻材質の密度を8.0t/m³とすると次のようになる。

$$8.0 \text{t/m}^3 \times 0.06396 \text{ dm}^3 = 0.5117 \text{ dt}$$

参考文献(1)によれば原子炉の重量は1.35tであるので、この高速炉システムと耐圧殻より構成される深海調査用動力源の重量をWは、次のようになる。

$$W = 0.5117 \text{ d} + 1.35 \text{ t} \quad \dots \dots \dots (2)$$

次に浮力材の重量を、2. 1節の(1)式を用いて計算する。V及びWに上記の計算で求めた値を代入すると次のようになる。

$$(2.705 + b) \times 1.025 = 0.5117d + 1.35 + b \times 0.54$$

この式を変形してb を求める。

$$b = 1.055 d - 2.934 t \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式でbが正の値をとるのは、dが2.78kmより大きい値のときである。dが2.78kmより小さい値のときは、浮力材を取りつけなくてもこの深海調査用動力源は、海水中で浮くことになる。従ってこの場合は全動力源システムの重量は、深海調査用動力源の重量Wと等しくなる。

一方、dが2.78kmより大きい値のときは次のようになる。

$$\text{全動力源システム重量} = W + 0.54b = 1.081 d - 0.234 t \dots\dots\dots (4)$$

図2. 4に全動力源システム重量をグラフで示す。

3. 20kWe 動力源

前章の10kWe の場合と同様な方法で20kWe 動力源の重量計算を行う。高速炉本体としては、10kWe の場合と同じ図2. 2の原子炉を使用する。密閉ブレイトンサイクルとしては、10kWe の発電量のものを2台使用する。このような、高速炉本体と密閉ブレイトンサイクルからなるシステムを、内部に設置する耐圧殻の形状を図3. 1に示す。

図3. 1の耐圧殻形状を用いて、耐圧殻の体積 V と高速炉システムと耐圧殻より構成される深海調査用動力源の重量を W を計算する。この計算をし易いように、図3. 1の耐圧殻を前章同様、上部の球形部分（添字1で表す）、中央の円筒部分（添字2で表す）、下部の半球形部分（添字3で表す）の3つの部分に分ける。

耐圧殻の体積 V は次のように計算される。

$$V_1 = (4 \pi / 3) \times (1.8/2)^3 = 3.054 \text{m}^3$$

$$V_2 = 1.6 \times \pi \times 0.4^2 = 0.804 \text{m}^3$$

$$V_3 = (2 \pi / 3) \times 0.4^3 = 0.134 \text{m}^3$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = 3.992 \text{m}^3$$

次に耐圧殻材質の重量を計算する。この為まず耐圧殻表面積 S を求める。

$$S_1 = 4 \pi \times (1.8/2)^2 - \pi \times 0.4^2 = 9.676 \text{m}^2$$

$$S_2 = 1.6 \times \pi \times 0.8 = 4.021 \text{m}^2$$

$$S_3 = 2 \pi \times (0.8/2)^2 = 1.005 \text{m}^2$$

耐圧殻の厚さ t は、深海調査用動力源の位置を水深 d kmとすると、水深6.5km で直径3mの球形では厚さ73mmという基本値より、次のように計算される。

$$t_1 = 73 \text{mm} \times (d/6.5) \times (1.8/3.0) = 6.738 \text{ dmm}$$

$$t_2 = 73 \text{mm} \times (d/6.5) \times (0.8/3.0) \times 2 = 5.990 \text{ dmm}$$

$$t_3 = 73 \text{mm} \times (d/6.5) \times (0.8/3.0) = 2.995 \text{ dmm}$$

耐圧殻材質の体積は次のようになる。

$$S_1 t_1 + S_2 t_2 + S_3 t_3 = (9.676 \text{m}^2 \times 6.738 \text{ dmm} + 4.021 \text{m}^2 \times 5.990 \text{ dmm} + 1.005 \text{m}^2 \times 2.995 \text{ dmm}) \times 10^{-3} \text{m/mm} = 0.09229 \text{ d m}^3$$

耐圧殻重量は耐圧殻材質の密度を 8.0t/m^3 とすると次のようになる。

$$8.0 \text{ t/m}^3 \times 0.09229 \text{ dm}^3 = 0.7383 \text{ dt}$$

参考文献(1)によれば原子炉の重量は1.35t であるので、この高速炉システムと耐圧殻より構成される深海調査用動力源の重量をWは、次のようになる。

$$W = 0.7383d + 1.35 \text{ t} \dots\dots\dots (2)$$

次に浮力材の重量を、2.1節の(1)式を用いて計算する。V及びWに上記の計算で求めた値を代入すると次のようになる。

$$(3.992 + b) \times 1.025 = 0.7383d + 1.35 + b \times 0.54$$

この式を変形してb を求める。

$$b = 1.522 \text{ d} - 5.653 \text{ t} \dots\dots\dots (3)$$

(3)式でbが正の値をとるのは、dが3.71kmより大きい値のときである。dが3.71kmより小さい値のときは、浮力材を取りつけなくてもこの深海調査用動力源は、海水中で浮くことになる。従ってこの場合は全動力源システムの重量は、深海調査用動力源の重量Wと等しくなる。

一方、dが3.71kmより大きい値のときは次のようになる。

$$\text{全動力源システム重量} = W + 0.54b = 1.560 \text{ d} - 1.703 \text{ t} \dots\dots\dots (4)$$

図3.2に全動力源システム重量をグラフで示す。

4. おわりに

近い将来に必要な見込まれる、小型軽量の深海調査用液体金属冷却高速炉動力源の重量に関して、追加計算を行った。10 kWeと20 kWeの動力源について計算した。10 kWeの動力源について得られた図2.4のグラフによれば、水深と浮力材を含む動力源重量の関係は次のようになる。

水深	重量
4,000 m (日本海海底)	約4 t
8,412 m (日本海溝)	約8.9 t
9,810 m (伊豆・小笠原海溝)	約10.4 t

上記いずれの場合も、空中重量約50 tの母船式潜水調査船に、搭載可能な重量と考えられる。

今後は、動力源の設計をつめて、より正確な重量計算を行う予定である。

参考文献

- (1) 動燃報告書 PNC ZN9410 91-176 、深海調査用高速炉システムの重量検討、大坪章他
- (2) "Design and Performance Characteristics for Low Power Space Reactor Systems," N. F. Shepard, et. al. (1990), IECEC 90 Paper No. 900145
- (3) 動燃報告書 PNC ZN9410 91-185 、6,500m級潜水調査船動力源の概念設計、大坪章他

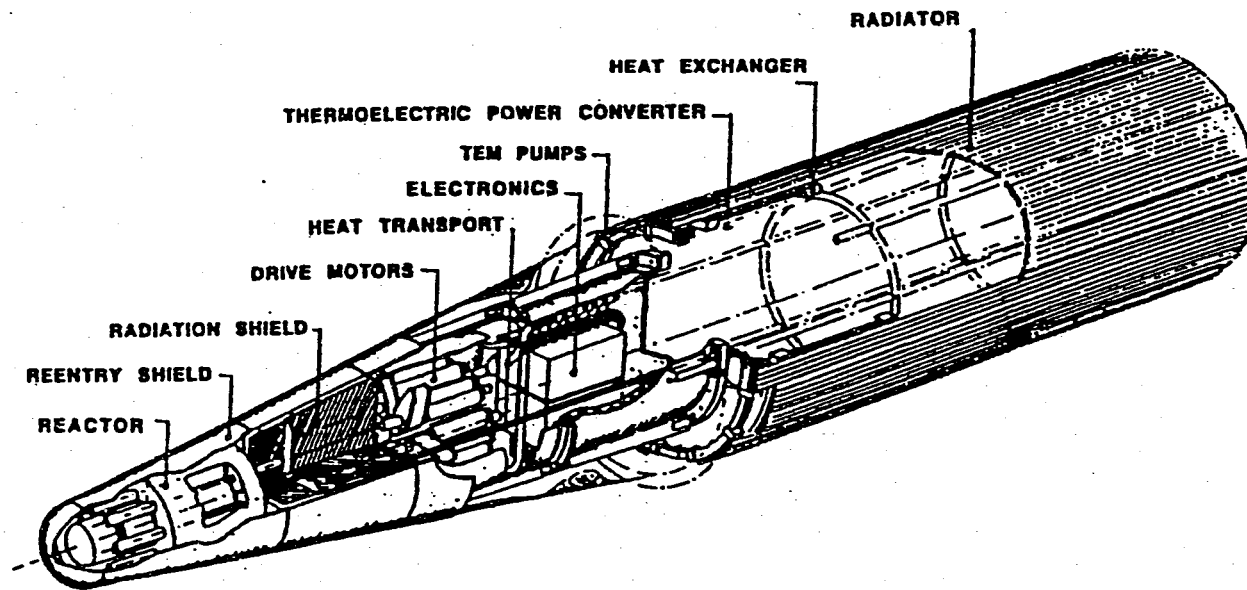


Figure 1. 10 kW_e Point Design Concept

図 2 . 1 10 kW_e 宇宙炉システム概念図
(熱電気発電)

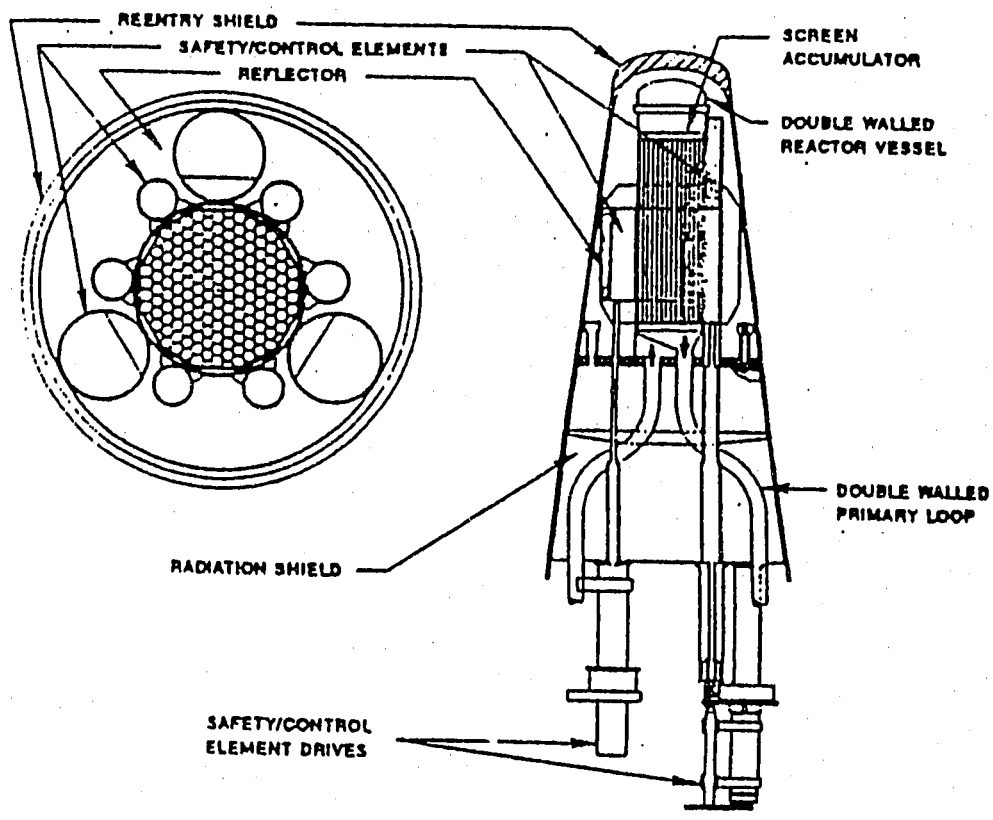


Figure 2. Reactor Power Assembly

图 2. 2 10 kWe 宇宙炉本体横纵断面图

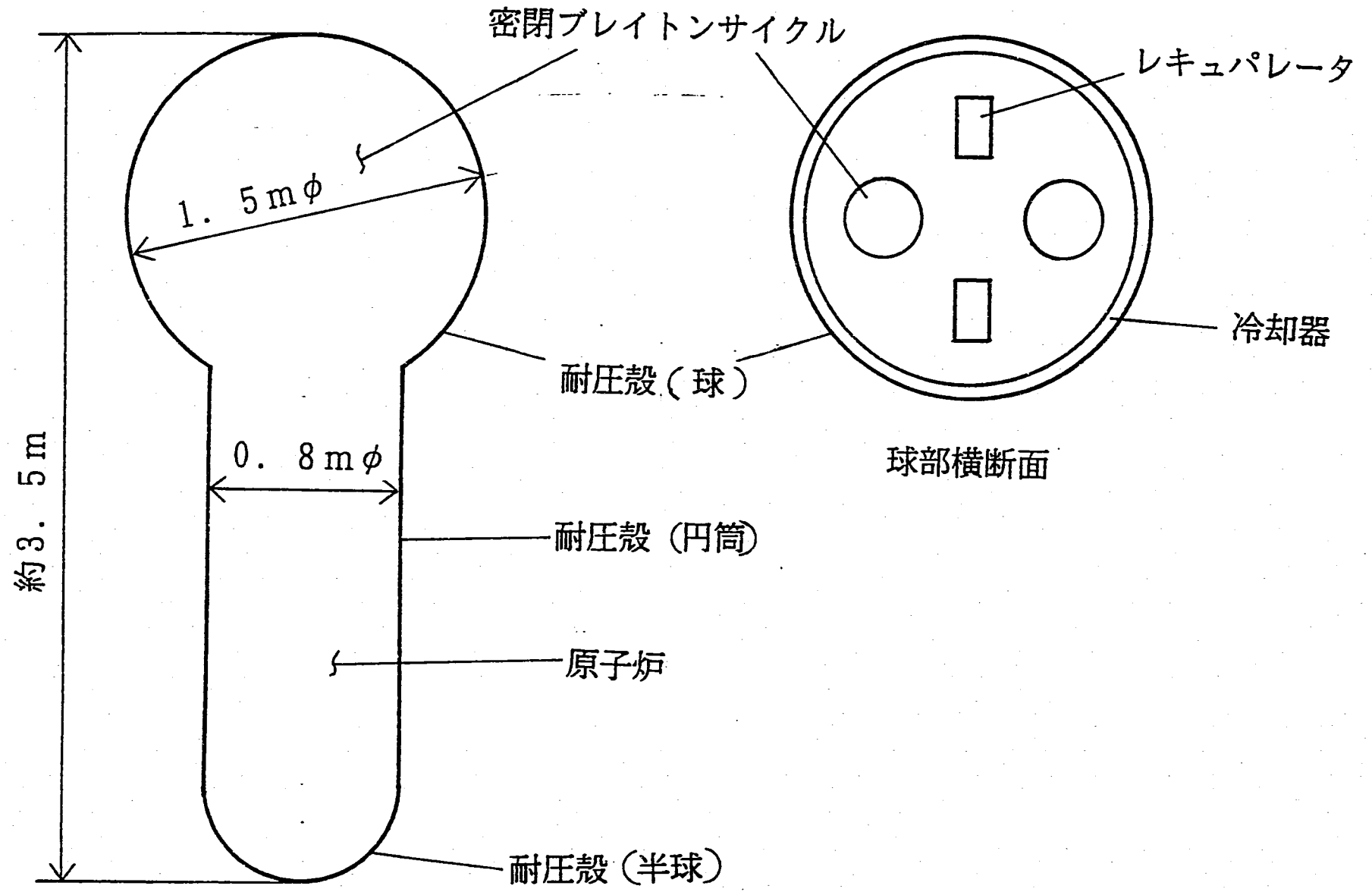


図 2. 3 深海調査用動力源システム耐圧殻形状 (10 kWe)

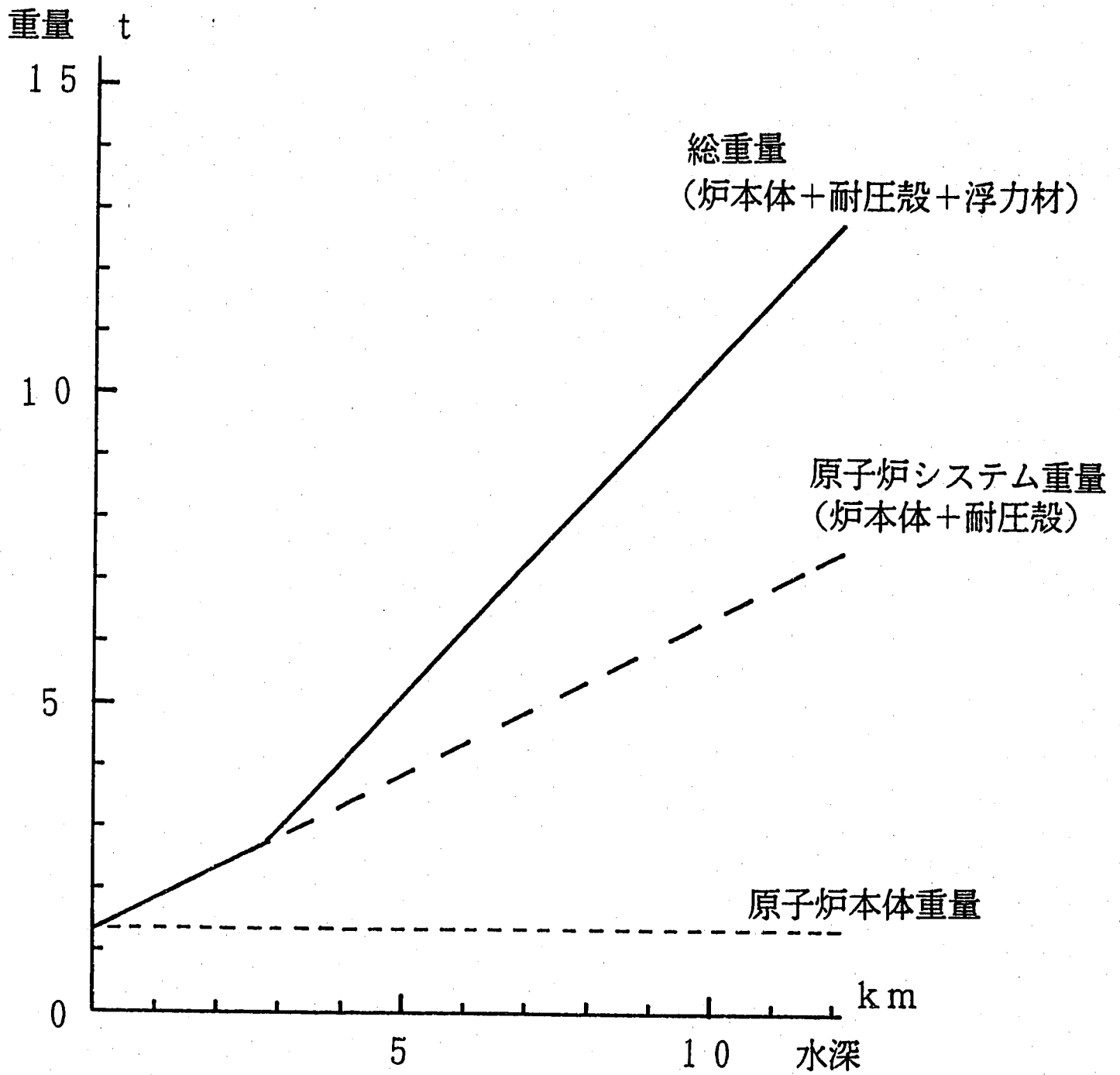


図 2. 4 全動力源システム重量と水深の関係
(10 kW)

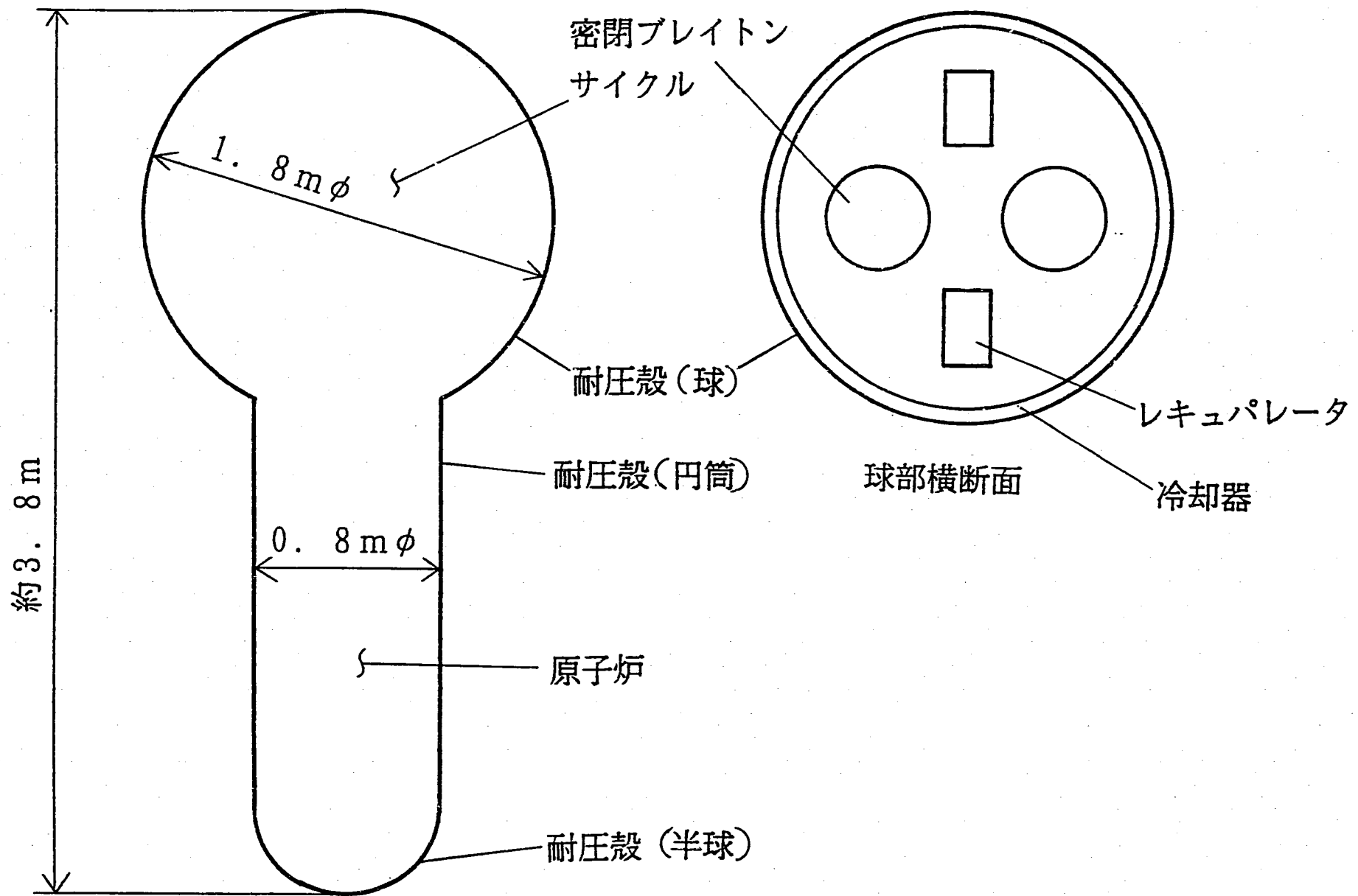


図3. 1 深海調査用動力源システム耐圧殻形状(20kWe)

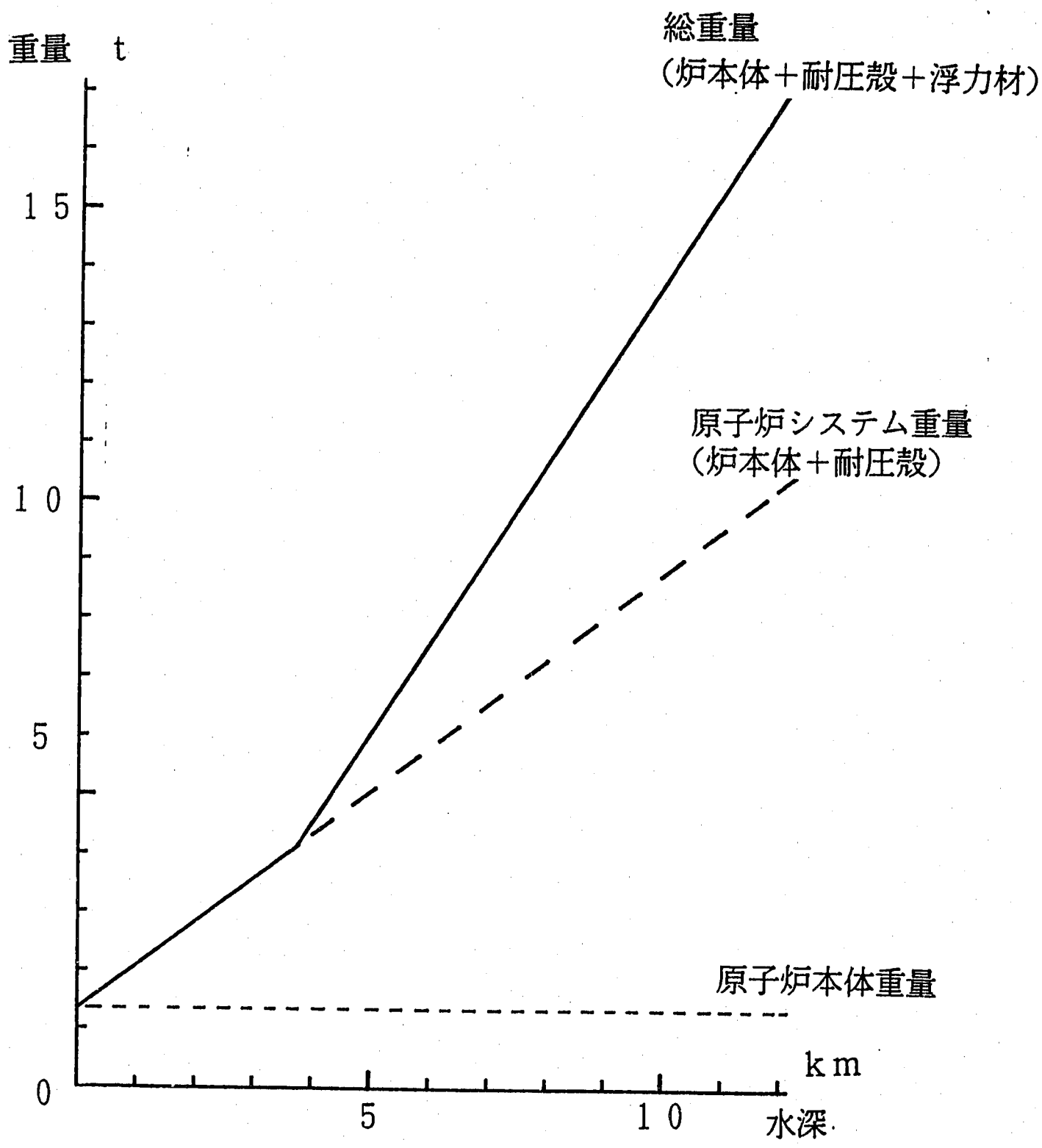


図 3. 2 全動力源システム重量と水深の関係
(20 kWe)