

原子力プラント機器の分解順序準最適化方式の開発

榎本敦子^{*1} 関洋^{*1} 吉田卓弥^{*1} 田畠潤也^{*2} 今村光孝^{*2} 長瀬博^{*2}

原子力プラントの廃止措置での機器や配管の解体作業計画の効率化と安全性の向上を目的に、作業被曝線量を最小化する機器の分解順序を導出する。分解順序の最適化は、NP完全問題として知られている。本論文では、機器の3次元形状モデルから分解状態の遷移グラフを自動的に生成する。その際に、作業被曝線量が高い遷移状態を取り除いて遷移グラフの規模を縮小する。縮小した遷移グラフ上で作業被曝線量を最小化する分解順序を探索する。部品の表面の露出度合いから表面線量率を推算し、分解動作に掛かる作業時間で積分して累積被曝線量を求める。

Keywords: 廃止措置, 解体, 分解作業順序, 最短経路探索, 被曝線量, 3D-CAD モデル

This research has developed an algorithm that minimizes exposure dose of disassembly sequence of equipment in a nuclear power plant in order to improve safety and efficiency of the decommissioning process. Time complexity to obtain the optimum disassembly sequence is known as a NP complete problem. A disassembly state graph is automatically constructed from 3D CAD models of the disassembly object. Size of the disassembly state graph is reduced by eliminating the higher exposure dose disassembly process when it is assigned to a node of the disassembly state graph. On the size reduced disassembly state graph, disassembly sequence with the smallest exposure dose is explored. The exposure dose rate in each disassembly process is estimated by exposed surface area of the components having the dose rates. The dose rates of the components are integrated by time of the disassembly process in the exploring disassembly sequence.

Keywords: decommission, dismantle, disassembly sequence, shortest path planning, exposure dose, 3D CAD model

1 緒言

原子力規制委員会設置法に従って40年運転制限（最大60年まで延長可）を適用した場合、今後、国内の多くの原子力プラントで廃止措置が同時進行する。2040年には15基から30基の原子炉で廃止措置が進行するピークを迎えると予想される。このような状況において、安全かつ効率的に廃止措置を実行するための確実な作業計画方法の開発が望まれている。

これに対し日立GEでは、プラントの3次元モデルとインベントリデータに基づいた放射線の空間線量率のシミュレーション、廃棄体・保管計画、解体・搬出計画からなる廃止措置エンジニアリング技術[1]を開発している。

本研究はとくに、大型機器の解体作業計画を対象とする。現状の大型機器の解体作業計画では、実績値に基づいた重量に対する線形近似式で作業時間を見積もる方式[2]が提案されている。しかし近似精度を確保するために十分な実績値の収集とパラメータ調整を要する。さらに、作業の安全性や効率を高めるためには、多数の解体手順を考えて試行錯誤する必要があるが、人手による考案には限度がある。また近年の海外の原子力プラントでは建設時に廃止措置の安全性の検証が必要な場合も見受けられる。3D-CADモデルから解体手順をデモンストレーションする技術は、安全な廃止措置を実証する為の有効なツールとなる。解体手順は切断や養生、分解などの多様な作業の総称であるが、本論文では、とくに機器や切断された部品の分解の順番である分解順序の計画を対象とする。

Near Optimal Disassembly Sequence Generation for Large Equipment in Nuclear plant by Atsuko ENOMOTO (atsuko.enomoto.ha@hitachi.com), Hiroshi SEKI, Takuya YOSHIDA, Junya TAHATA, Mitsutaka IMAMURA and Hiroshi NAGASE

*1 株式会社 日立製作所 研究開発グループ

Hitachi, Ltd., Development & Research Group

〒244-0817 神奈川県横浜市戸塚区吉田町 292

*2 日立GE ニュークリヤー・エナジー株式会社

Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.

〒317-0073 茨城県日立市幸町 3-1-1

(Received 2 April 2018; accepted 23 July 2019)

目的関数を最適化する分解順序を求める問題は、数理計画の分野でNP完全問題として知られている。NP完全問題とは、その問題の規模を規定する変数の多項式で表される計算時間でその問題を解くことができない。つまり、長大な計算時間がかかる問題である[3]。本論文で言う分解とは、解体を構成する作業において、組立品を構成する部品または、その部品を切断した部片を組み立った元の状態から分離する動作を意味する。分解順序の導出は、分解する機器を構成する部品数の階乗に比例する計算時間を要する問題となるため、部品数が100以下の機器に対しても業務のボトルネックとなる計算時間が想定される[4]。

そのため、部品数が数百点以上の機器に対して、実用時間で分解順序を導出するためには、準最適化アルゴリズムを開発する必要があった。2000年代に入り、ファジー、ニューロ、遺伝的アルゴリズムなどのヒューリスティックなアルゴリズムが提案された[5-9]。しかしこれらのアルゴリズムは、導出された分解順序の精度が明らかでないこと、問題規模に対しての計算時間が予測しにくいという2つの課題があった。

これらの課題に対し、筆者らは分解状態の遷移グラフの枝の分岐数を限定することにより、目的関数の最小値に漸近させる準最適化探索方式を提案し、演算時間を分解状態数の二乗オーダーにできることを示した[10]。

本論文では、分解順序準最適化方式の目的関数に作業被曝線量を用いて、機器の解体作業での作業被曝線量を低減する分解順序探索方式を開発した。熱交換器の分解順序探索にて、作業被曝線量が8.2%低減するシミュレーション結果を得た。

2 分解順序の準最適化探索方式の概要

2.1 背景

分解順序の最適化探索アルゴリズムとしては、1993年に金原らが、Petri netで分解作業の過程で生じる分解物の可能なすべての遷移を表した。その分解作業と分解物の遷移行列を整数計画法で最適化する方法を提案した[11]。

Petri net 上では、分解作業と分解物の 2 種類のノードからなる 2 部グラフで表される。Fig.1 に 4 つの部品 a, b, c, d から成る組立品の分解作業の Petri net を示す。Petri net の四角は分解物を、水平にひかれた実線分は分解作業を表す。分解作業から分解物へ矢印が伸びる。Fig.1 の Petri net では 2 つの分解物に分解する分解作業のみを示している。3 つ以上の分解物に分解する表現も可能であるが、その場合も 2 つの分解物に分解する分解作業に分けて、複数回連結することでき表現できる。

一般的に、部品数 N の組立品を分解する場合、とり得るすべての分解物の数を考えれば、最大値は 2^N 個となる。ただし、部品間の幾何学的な拘束関係から生成できない分解物もあるため、実際は 2^N 個より少ないが、数理計画では最悪の条件でその問題を評価する。整数計画法を用いた場合の問題規模は分解物の数(2^N)に依存する。したがって、その問題規模は部品数が増大すると指数関数的に増大する。さらに、整数計画法は NP 完全問題と知られるので、分解順序の導出は、問題規模に対して階乗オーダーで計算時間が増加してしまう($2^N!$)。これらの理由から、整数計画法を用いた分解順序の最適化法は、十数点の組立品の分解にしか適用例がなかった[12-14]。

この課題に対し筆者らは、計算時間が問題規模に対し多項式オーダーと高速な Dijkstra 法[15,16]を応用した準最適化分解順序探索方法を提案した。Dijkstra 法は問題規模数の二乗の計算時間が保証される最適化法である。

しかし、Dijkstra 法が適用できるのは、グラフのノードの種類が単一な単純グラフである。Petri net は 2 種類のノードと接続方法が二分される二部グラフであり Dijkstra 法を適用できない。そこで、筆者らは、分解物の遷移状態を単純グラフで表した「分解状態遷移グラフ」を考案した。さらに、分解作業性の評価指標を導入して作業性の悪い分解作業を切り捨てるこにより問題規模を縮小して、高速な

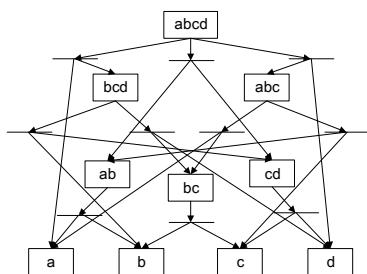


Fig.1 Petri net

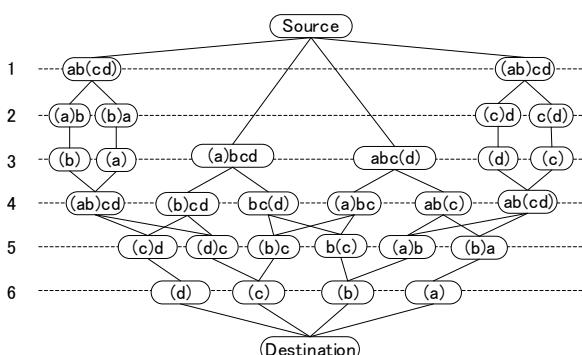


Fig.2 Disassembly state graph

分解順序探索方式を開発した[10]。2 章ではこの方式の概要を説明する。

2.2 分解状態遷移グラフ

Fig.2 に筆者らが考案した分解状態遷移グラフを示す。状態遷移グラフの長丸は分解状態を表す。この長丸はグラフのノードを示す。ノード間を結ぶ実線分をエッジと呼ぶ。エッジは、上の状態から下の状態へ遷移することが可能であるというノード間の関係を示す。

一番上の source ノードは、分解前の組立品の初期状態に当たり、一番下の destination ノードは、分解する部品がなくなった終了状態を表す。source ノードを始点とし、destination ノードを終点として上から下方向にエッジをたどって 1 本のパスを作れば、1 つの分解順序が得られる。Dijkstra 探索では、エッジに与えられたスコアに対し、source から destination までのスコアの和が最小なパスを探索する。

分解状態は、分解作業の結果生成された 2 つの分解物を、()内に示す分離された分解物と、()外の残された分解物で表す。たとえば、左端のノード ab(cd)は、分解物 cd を分離し、分解物 ab が残った状態である。残った分解物 ab は次の分解状態へと遷移する。分解物 ab の分離が終わったら、分離された分解物 cd の分解作業に遷移する。分解物が 1 つずつ分離される場合は中央の 2 つのノード(a)bcd と abc(d)から下に伸びるパスに表記されている。

分解状態グラフの縦方向の深さは、分解作業のステップ数となる(以後、分解作業ステップと表記)。分解作業ステップ数は、その分解順序がたどる分解状態ノードの数である。分解作業ステップ数が最も小さいのは、1 部品ずつ分離される分解順序である。Fig.2 の場合、分解作業ステップ数が最も小さい分解順序は 4 である。これは部品数 N に等しい。

これに対し、たとえば、ab(cd)や(ab)cd を 1 ステップ目とする分解順序では、複数の部品で構成される分離物の数だけ、ノード数が増えるため、分解作業ステップ数が増す。最もノード数が増えるのは、2 部品ずつ分離される分解順序である。その分解順序は、2 部品が分離されるノードを $N/2$ 個含む。したがって、分解状態の階層の最大値は $3N/2$ となる。ab(cd)ノードの遷移はこれにある、 $N=4$ で分解作業ステップ数の最大は 6 となる。

Fig.2 の分解状態遷移グラフに破線で表された横軸の数が分解作業ステップ数となる。同一な分解作業ステップ上に横にならぶ分解ノードの数を M とおく。 $k < 3N/2$ とおけば、 M の考えられる最大数は、 $2^N/k$ である。 k が分解作業ステップ数の最大より小さくなるのは、分解状態ノードによっては重複して現れるためである。分解作業ステップが最大で $3N/2$ であるから、分解状態グラフのノードの数は、最大で $3MN/2$ となる。このことから、分解状態グラフのノード数は Petri net のノード数より大きくなる。

したがって、分解状態ノード数の 2 乗オーダーの計算時間を保証される Dijkstra 法を用いたとしても、組立品の部品数が大きい場合には、分解状態ノード数の増加を防ぐ方策が必要である。

2.3 目的関数と分解状態ノード数の低減

Dijkstra 法[15,16]は、グラフ上に定めた始点ノードと終点ノード間をつないで、与えられた目的関数を最小化する経路を探索する最短経路問題のアルゴリズムである。ノードやエッジには、選択した経路を評価するためのスコアが与えられている。経路の探索は、ノードとエッジをたどる度にスコアを足しこんでいく。Dijkstra 法は、足しこまれたスコアが最小となる経路を探索する動的計画法の一種である。

Fig.3 は 4 つの部品 a, b, c, d から構成される機器の分解状態遷移グラフの一部を示す。楕円形がノードを示す。ここでのノードは、その分解状態の機器の構成部品を示す。 $v(k-1,i)$ は、 $k-1$ 番目の分解作業ステップ上の i 番目の分解状態における機器の構成部品を示す。ここでは、部品 a が分解されて、部品 b, c, d が未分解の状態を示している。分解された部品を白で示す。次の k 番目の分解作業ステップにとり得る分解状態を $v(k,1)$, $v(k,2)$ および $v(k,3)$ とする。分解状態ノード $v(k-1,i)$ からのびる 3 本のエッジをたどって $v(k,1)$, $v(k,2)$ または $v(k,3)$ に移る際に、それぞれのスコア $s(k,i,1)$, $s(k,i,2)$ または $s(k,i,3)$ を目的関数値に足しこむ。

スコアは、探索の目的に応じて複数の指標で構成する。作業被曝などの安全上の条件のない一般的な分解作業の場合、以下の 3 つの指標の比重線形和が提案されている[9]。

(1) $s_1(k,i,*)$ ：他の部品からの荷重

これは、他の部品の荷重を支える部品の分離を防ぐ。

$$s_1(k,i,1) = 0, s_1(k,i,2) = w_d, s_1(k,i,3) = w_d \quad (1)$$

ここで、部品 d の荷重を w_d とおく。

(2) $s_2(k,i,*)$ ： $v(k-1,i)$ で分離した部品に対する隣接距離

これは **Fig.4** の隣接グラフ上のノード間をつなぐパスの最短エッジ数である。近い部品から分離される。

$$s_2(k,i,1) = 1, s_2(k,i,2) = 1, s_2(k,i,3) = 2 \quad (2)$$

(3) $s_3(k,i,*)$ ：座標軸にそった部品の配置順序

指標 $s_3(k,i,*)$ は、部品の配置に関する順序である。次の分解物までのアプローチ動作をより規則的にとることにより作業者の身体的負荷を低減する効果があり、組立作業でしばしば用いられる現場規則である。ここでは分解作業に同様の効果を導入する。

Fig.3 の組立品では、+z 軸に沿って部品の並び順を第 1 に評価し、次に+x 軸に沿って部品の並び順を評価する。+z 軸に沿った順番は a=d**c** となる。同じ順位の a と d および b と c の間に、+x 軸に沿った順番 b および d<c を入れると、a<d**c** となる。部品の配置に関する値を $order(\{a\})=1$, $order(\{d\})=2$, $order(\{b\})=3$, $order(\{c\})=4$ と入れる。部品 a と次に分離される部品との値の差をとって、以下のように配置の評価値が求められる。

$$\begin{aligned} s_3(k,i,1) &= order(d) - order(a) = 1 \\ s_3(k,i,2) &= order(b) - order(a) = 2 \\ s_3(k,i,3) &= order(c) - order(a) = 3 \end{aligned} \quad (3)$$

これら 3 つの指標の線形比重和をスコアとする。

$$S(k,i,j) = a_1 S_1(k,i,j) + a_2 S_2(k,i,j) + a_3 S_3(k,i,j) \quad (4)$$

スコアの昇順に分解作業ステップ k の 3 つの分解状態ノードを並べる。

$$s(k,i,1) = 2 < s(k,i,2) = 3 + w_d < s(k,i,3) = 5 + w_d \quad (5)$$

設定した上限値だけの分解状態ノード数をスコアが小さい順に残し、それ以外の分解状態ノードを切り捨てる。これにより分解状態ノード数の増大を抑制する。目的関数の厳密な最小化はできないが、比較的良好な分解状態ノードの中で目的関数を最小化する準最適化分解順序を、有限時間内で探索することが可能となる。分解状態ノード数の上限を 2 と設定すれば、式(5)の不等式では、ノード $v(k,3)$ が消去される。

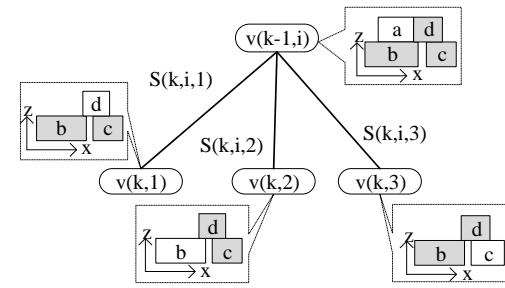


Fig.3 Edge pruning on Dijkstra search

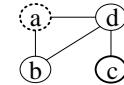


Fig.4 Adjacency graph

3 被曝線量を低減する分解順序探索方式

3.1 被曝線量の推算方式

2 章では、一般的な分解作業における分解順序の導出について[10]の方式に従って概要を説明した。ここで、原子力プラント内の機器の解体作業では、作業被曝線量を極力低減することが重要である。そこで、2 章で説明した準最適化分解順序方式に基づいて、作業被曝線量を目的関数とした分解順の準最適化方式を提案する。

以下では、プラント機器を分解する際に、その組立品を構成するいくつかの部品の表面から放射線が出ている場合を考える。分解作業中に作業者が受ける被曝線量は、被曝線量率を作業時間で積分して得られる。しかし、分解作業の途中の被曝線量率は、分解作業の状態とともに変化するはずである。放射線の出ている部品を取り囲んでいる部品が分解により取り除かれると、放射線の出ている部品の露出面積が増加することにより、被曝線量が増加すると仮定する。一方、放射線の出ている部品を分離した後は、その部品に起因する被曝線量が消失すると仮定する。作業の状態は時間連続的に変化するので、被曝線量率も時間連続的に変化するはずであるが、本論文では、分解作業ステップ

ごとに段階的に変化すると仮定して簡略化する。

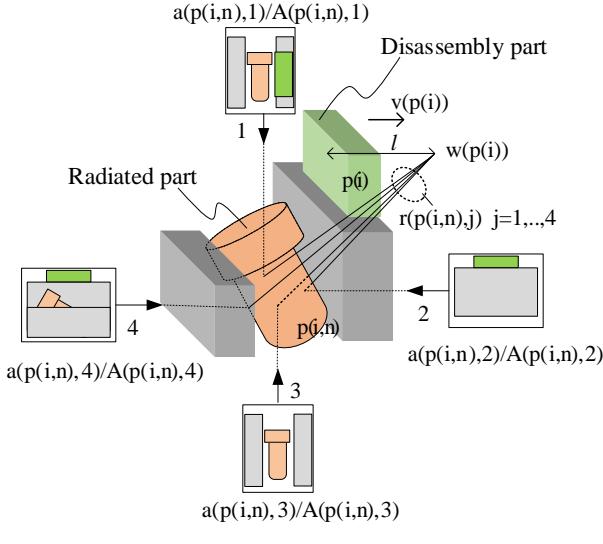


Fig.5 Exposed surface area rate in each direction

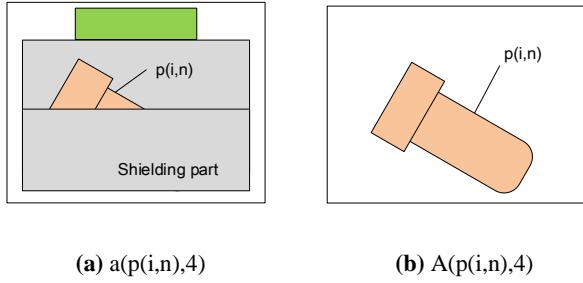


Fig.6 Surface areas of $p(i,n)$ taken from 4th direction

3.1.1 露出面積による補正

本方式では放射量率が部品の露出面積に比例すると仮定する。すなわち、すべての表面積が露出していれば、その部品の表面線量率と等しいが、周辺にある部品により遮蔽される部分があれば、露出面積の全体表面積に占める比率を乗じた線量率となると仮定する。

つぎに、一部の部品が分離された分解状態で、放射線を出す部品の表面積の全体表面積に占める比率をコンピュータグラフィックス（以後、CG と表記）処理により推定する方法を提案する。Fig.5 のような分解状態を考える。この分解作業ステップ i において分解される部品を $p(i)$ とする。このときに放射線が出ている部品 $p(i,n)$ が残っているとする。 $p(i,n)$ を複数の方向から CG 上のカメラ（以後、CG カメラと表記）で撮影する。Fig.5 では 4 方向から撮影した画像が示されている。

いま、Fig.5 における第 4 方向の CG カメラで取得した 1 つの画像の模擬図を Fig.6 に示す。放射線を出している部品 $p(i,n)$ に対して、CG カメラで 2 種類の画像を取得する。Fig.6 (a) は分解状態での画像であり、部品 $p(i,n)$ が発する放射線を遮蔽する周辺の部品も表示されている。これに対し Fig.6 (b) は、Fig.6 (a) と CG カメラの姿勢は同じであるが、放射線を出している部品 $p(i,n)$ だけを表示させた画像である。これらの 2 つの画像に写された放射線を出している部品 $p(i,n)$ の占める画素数の比率から、被曝線量率を補正する。

CG カメラの姿勢を j として、姿勢 j の CG カメラの画素数の比率を、

$$0 \leq \frac{a(p(i,n),j)}{A(p(i,n),j)} \leq 1 \quad (6)$$

とする。式(6)の画素数の比率を、複数の姿勢 $j = 1, \dots, m$ から式(6)の値を取得するとする。部品 $p(i,n)$ の全表面積が露出しているときの j 方向の表面から放射される作業被曝線量率を $DR(p(i,n),j)$ とする。方向別に被曝線量率を設定できるようにする理由は、部品によって被曝線量率に方向性のある場合を想定してある。分解作業ステップ i における部品 $p(i,n)$ の作業被曝線量率の補正值を $doR(p(i,n))$ とすると、

$$doR(p(i,n)) = \frac{\sum_{j=1}^m a(p(i,n),j) DR(p(i,n),j)}{\sum_{j=1}^m A(p(i,n),j)} \quad (7)$$

式(6)から、

$$doR(p(i,n)) \leq \sum_{j=1}^m DR(p(i,n),j) \quad (8)$$

すなわち、補正された被曝線量率は、補正なしの方向別の被曝線量率の総和より大きくなない。

3.1.2 作業者との距離による補正

ここで、部品 $p(i,n)$ と作業者との距離によっても作業被曝線量率を補正する。いま、作業者の位置を $w(p(i))$ とおく。ここで作業者は、分解作業ステップ i で分離する部品 $p(i)$ に対して位置をとると想定する。Fig.6 で $w(p(i))$ は部品 $p(i)$ の分解方向 $v(p(i))$ に沿って部品 $p(i)$ の中心位置 $q(p(i))$ から距離 l だけはなれた位置をとるとすると、

$$w(p(i)) = q(p(i)) + l \cdot v(p(i)) \quad (9)$$

放射線を出す部品 $p(i,n)$ の j 方向から撮影された露出表面の中心位置を $q(p(i,n),j)$ とする。作業者の位置 $w(p(i))$ から、放射線を出す部品 $p(i,n)$ の j 方向の露出表面の中心位置までの距離 $r(p(i,n),j)$ は、

$$r(p(i,n),j) = |w(p(i)) - q(p(i,n),j)| \quad (10)$$

ここで、部品 $p(i)$ の分解方向 $v(p(i))$ は、部品間の幾何学的拘束関係から導出することができる。その導出方法は[3, 9]を参照されたい。

放射線を出す部品表面から作業者までの距離の増加に伴い、作業被曝線量率が減少することを、ここでは距離の 2 乗の指標関数の逆数を用いて表すと、以下の式となる。

$$doR(p(i,n)) = \frac{\sum_{j=1}^m e^{-r(p(i,n),j)^2} a(p(i,n),j) DR(p(i,n),j)}{\sum_{j=1}^m A(p(i,n),j)} \quad (11)$$

このとき、放射線を出している部品が N 個あるとすれば、式(11)を $n=1, \dots, N$ で総和して、

$$doR(p(i)) = \sum_{n=1}^N \frac{\sum_{j=1}^m e^{-r(p(i,n),j)^2} a(p(i,n),j) DR(p(i,n),j)}{\sum_{j=1}^m A(p(i,n),j)} \quad (12)$$

と補正する。

なお、本章で提案した補正式には議論の余地があると考える。本論文では、1 つの案として提示する。

3.2 被曝線量を最小化する分解順序

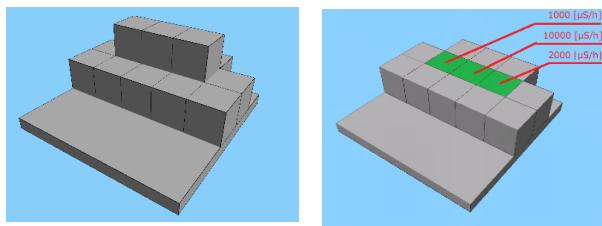
2.2 節で示した分解順序探索のスコア式(4)を、作業被曝

線量に変える。分解状態ノード $v(k-1, i)$ から次の分解作業ステップにより分解状態ノード $v(k, j)$ に遷移するとき、部品 $p(v(k, j))$ が分離されるとして、そのときのスコア $S(k, i, j)$ を、

$$S(k, i, j) = doR(p(v(k, j))) t(p(v(k, j))) \quad (13)$$

ここで、 $t(p(v(k, j)))$ はその分解作業に掛かる時間である。分解物を分離する時間は、分離する距離と作業の速度によって変化する。分離する距離は分解物を移動する終点を設定すれば、経路探索を行うことにより概算することができる [17, 18]。また、作業の速度は、分解物の寸法と重量により人手による搬送か、クレーンや台車を用いるかを判別して、所定の速度を設定する。

式(13)のスコアを用いた準最適化分解順序探索による、作業被曝線量の推算値を実験した。検証を容易にするため、Fig.7 に示すような一辺の長さが 100 mm の立方体 16 個からなるアセンブリモデル(a)を用いた。分解対象であるアセンブリモデルは内部に放射線量を持つ 3 つの部品(b)を内部に有する。それらの部品の放射線量は、1,000 $\mu\text{Sv/h}$, 10,000 $\mu\text{Sv/h}$, 2,000 $\mu\text{Sv/h}$ とした。



(a) Assembly model

(b) Radio activated parts

Fig.7 Test model for disassembly sequence generation

2.2 章で説明した分解状態グラフの分解状態ノード数の上限値を変えて分解順序の作業被曝線量を算出する実験を行った。分解状態ノード数の上限値は、1, 4, 8, 16, 32, 64 として分解順序を探索し、その結果の作業被曝線量を Fig.8 に示す。

結果から、分解状態ノード数の上限値が小さいほど、積算される被曝線量が大きく算出されている。分解状態グラフの分解状態ノード数の上限値を大きくするほど積算される作業被曝線量が小さい分解順序が得られている。この理由として、分解状態ノード数の上限値が小さいほど、可能性のある候補を消去してしまうことになり、積算される被曝線量が大きな分解順序となると推察する。

ある時刻以降の積算被曝線量の増加が停止し、一定値となってるのは、放射線量を持つ 3 つの部品がすべて取り除かれた時点で、被曝線量率がゼロとなり、それ以降の作業時間に対する放射線量の積算がなくなるためである。算出された順序により、放射線量を持つ部品の分解する順番が異なるため、一定になる時刻が異なる。

放射能を持つ部品は、より早い時点で分解するほど、作業被曝線量を低減できるはずである。分解状態ノード数の上限値を大きくするほど、この傾向が表れていることを、Fig.8 は示している。Fig.9 に、Fig.8 の上限ノード数 1 と 64 の 2 つの分解順序における被曝線量率の時間経過を示す。

分解前の被曝線量率はゼロであるが、分解をはじめて、

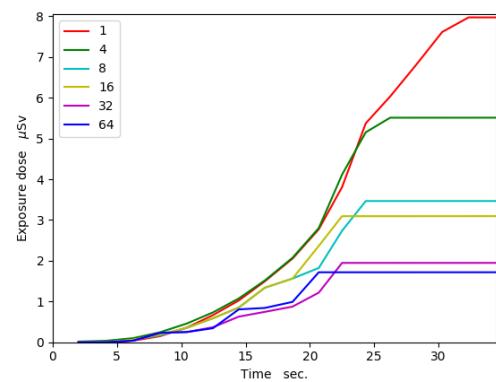


Fig.8 Exposure dose vs. upper limit of nodes in disassembly state nodes

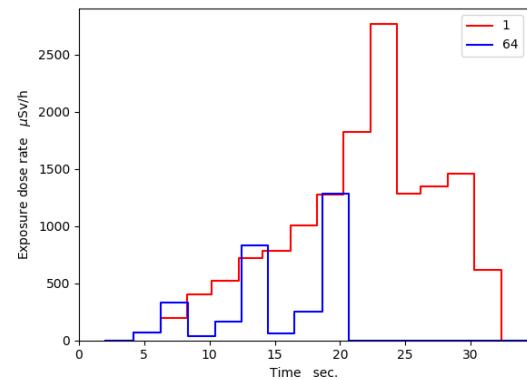


Fig.9 Exposure dose rate of upper limit 1 and 64 in Fig.8

放射能を有する部品が露出すると、被曝線量率が増加する。階段状に線量が変化するのは、分解ステップ単位で被曝線量率を算出しているためである。被曝線量率の大きな部品をどの時点で分離するかで被曝線量率が大きく変化する。上限ノード数 1 の場合、放射線を出す部品が露出した状態の時間が 4 秒から続き、最後の分解ステップで放射線量を持つ部品がすべて取り除かれたため、その間に被曝線量が大幅に加算されている。

一方、上限値 64 の分解順序の場合、放射線を出す 3 部品が露出した状態から短時間で取り除かれている。1 つ目の部品は 8 秒後に、2 つ目の部品は 14 秒過ぎに、3 つ目の部品は 21 秒ごろに取り除かれたため、被曝線量の増加が抑えられている。

ここでの分解物の搬出速度はすべての部品で一定の 500 mm/s とした。設定した搬出点までの距離は平均 1.02 m と算出された。作業者から部品までの距離 l は 500 mm とした。分解作業の時間は 34.5 sec と算出された。

上の検証では、どの部品も一定速度で分解・搬送したが、実際の作業では、部品の属性に応じた適当な速度を設定すべきと考える。

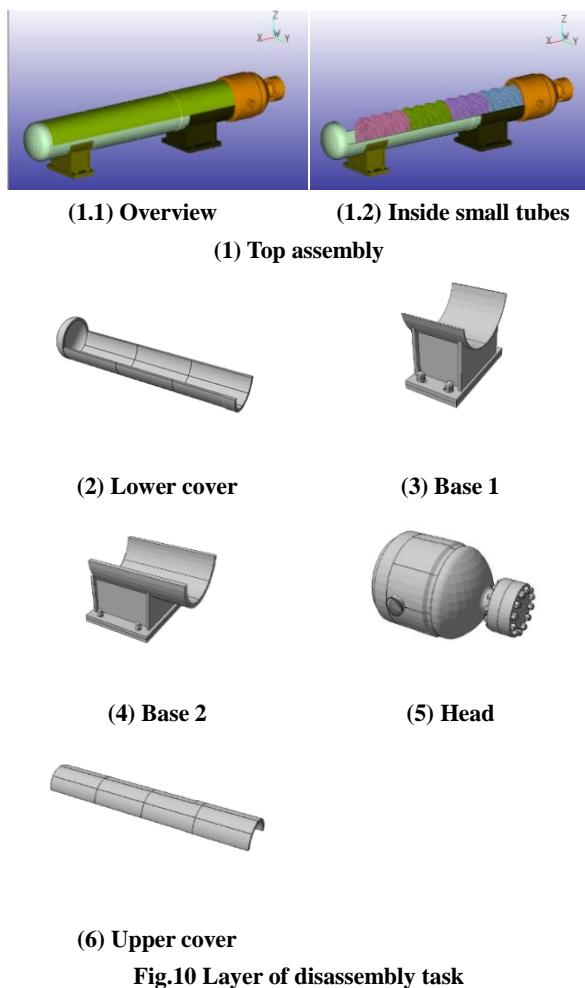


Fig.10 Layer of disassembly task

4 热交換器を用いた検証

4.1 分解作業単位による分解順序生成

原子力設備には部品点数が 1,000 点以上の機器がある。そのような大規模な組立品の分解順序を短時間で導出するために、解体作業計画の経験者からのヒアリングに基づき、部品をグループ化し、グループ単位で分解順序を求めた。Fig.10 に熱交換器の分解作業単位を示す。熱交換器は 6 つのグループに分割する。

Fig.10 (1) Top assembly は色分けされた 9 つの部品で構成される。外側 5 つの部品 Fig.10 (1.1) と内側の細管を 4 つの部品 Fig.10 (1.2) として扱う。内側の細管は 732 個の CAD モデルで構成されている。しかし分解作業では、細管を CAD モデルの形状の単位で分離するのではなく、Fig.10 (1.2) に示すように細管の束を 4 つの輪切りにカットして、4 つの部品として扱う。

熱交換器の外側の円筒カバー Fig.10 (2) と Fig.10 (6) は、CAD モデルとしては 2 つの半円筒面で設計されている。実際の解体作業では、それらを切断しながら分解する。そのため、CAD モデルをそのまま用いると、実際に分解する単位が異なってしまう。そこで、収納容器に入る寸法に CAD 上で半円筒モデルをカットした部片モデルを作成した。Fig.10 の(2)と(6)は、カバーにひかれていた線にそってカットした複数の部片モデルを CAD 上でアセンブリした組立

モデルとして示している。

以上の CAD 上の操作により、分解順序探索の対象となる。

部品の総数を 123 点とし、Fig.10 に示すグループごとに分解状態グラフを生成して分解順序を求めた。

まず、分解作業のグループ分けによる計算時間の短縮化について検証した。検証には、機械部品の一般的な分解作業を評価するスコア式(4)を用いた。スコア式(4)の係数の配分は、対象とする機器に対して、順序を生成した結果を受けて、より自然な順序が生成できるよう調整する。Fig.10 の熱交換器用に調整した係数を Table 1 に示す。計算に用いた CPU は Intel® Xeon® CPU (3.33 GHz) である。Fig.10 の分解作業にグループ分けして 6 つの分解状態グラフについての計算時間の結果を Table 2 に示す。計算時間の合計は 6 分 33 秒であった。これに対し、グループ分けせずに 123 点の部品で 1 つの分解状態グラフを生成して分解順序を求めた場合は、65 分 4 秒であった。グループ単位で分解順序を求ることにより、大幅に計算時間が短縮された。

つぎに、自動生成された順序のうち並べ替えによる順序の修正を要する部品の数を調べた。ここでは、一般的な分解作業を行う際に、不自然な順序をとっている部品を並べ替えるとした。Table 2 の 2 列目ノード数とは、分解状態グラフのノードすなわち対象とした部片と部品の総数である。並べ替えが必要だったノード数を 3 列目に示す。分解作業のグループ分けを行った場合は、Table 2 に示すように全 123 個の中で 8 個であり、順序の修正率は 6.5% であった。ここで修正率とは、探索された分解順序に対し、並べ替えて修正した部品数の全体の部品数に対する百分率とした。

Table 1 Parameters of Equation (4)

a_1	a_2	a_3
0.25	0.25	0.5

Table 2 Computation result of disassembly sequence

	Num. of nodes	Corrected nodes	Comp. time (h:m:s.)
(1) Top assy.	9	2	0:04:36
(2) Lower cover	12	0	0:00:02
(3) Base 1	20	1	0:00:11
(4) Base 2	18	1	0:00:10
(5) Head	48	4	0:01:29
(6) Upper cover	16	0	0:00:05
Total	123	8	0:06:33
correction rate (%)	-	6.50	-

これに対し、グループ分けせずに 123 点の部品で 1 つの分解状態グラフを生成して分解順序を求めた場合の修正率は 44% であった。グループ単位で分解順序を求ることにより、大幅に修正率が改善された。

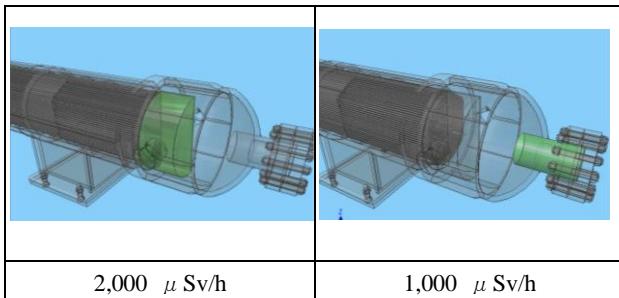


Fig.11 Radio activated components in head

Table 3 Condition of computation

Prismatic velocity	500 mm/s(up to 10 kg)
	100 mm/s(up to 20 kg)
	10 mm/s(over 20 kg)
Worker distance to remove part	$l = 500\text{mm}$ in Equ.(9)
Environmental exposure dose rate	$0.14\text{ }\mu\text{Sv/h}$
Limit of disassembly state nodes	8 /disassembly step
CG image size	256 pixels
CG camera poses/components	$m = 6$ in Equ.(12)

4.2 作業被曝線量を低減する分解順序

分解作業のスコアに被曝線量を用いて Fig.10 の Head の分解順序を求める実験を行った。Head を構成する部片のうち、Fig.11 に示す緑色の 2 つの部品がそれぞれ、 $2,000\text{ }\mu\text{Sv/h}$ と $1,000\text{ }\mu\text{Sv/h}$ の放射線量率があるとした。線量率はどの方向も同一とした。

計算条件を Table 3 に示す。部品の移動速度として、部品の重量により 3 段階の速度を設定した。正確な部品の重量は CAD モデルの属性値として設定する必要がある。

一般的な分解作業を評価するスコア式(4)で求めた分解順序と、被曝線量を評価するスコア式(13)で求めた分解順序による作業被曝線量を Fig.12 に、そのときの作業被曝線量率を Fig.13 に示す。推定作業時間は 10 分 39.8 秒である。

作業被曝線量をスコア用いて求めた分解順序では、作業被曝線量は $135.4\text{ }\mu\text{Sv}$ で、一般的な分解作業のスコアを用いた場合の $147.1\text{ }\mu\text{Sv}$ よりも $11.7\text{ }\mu\text{Sv}$ 少なくなった。作業被曝線量率の高い部品の露出を抑えて、露出してからは早めに分離することより、作業被曝線量が小さくなる。ただし、分解順序は幾何学的な拘束関係の制約があるので、顕著な差異は得られなかった。しかし、被曝線量率の時間経過を予測できるため、遮蔽や作業者の交代などの作業計画を具体的に立てることに役立つと考える。

ここでいう作業時間は、部品を所定の終点まで移動する時間の加算値であり、段取り、切断、養生、箱詰めなどの実際に行われる付帯作業を含まない。これらの付帯作業についても、被曝線量と被曝線量率の時間推移をみながら、どの分解作業ステップの前後に挿入するかを検討すれば、その時点の被曝線量率を用いて付帯作業の被曝線量を推算することが可能である。より詳細な作業時間の推定方法としては[19-21]を参照されたい。

Fig.13 により、どの時点で被曝線量率が顕著に増加するかがわかるため、どの時点で遮蔽を行う必要があるかを詳細に計画することにより、作業の安全性を高めることが可能である。

作業被曝線量をスコア用いた場合の演算時間は 97 分 12.6 秒であった (Intel® Xeon® CPU (3.33 GHz) 使用)。被曝線量を用いない場合の演算時間 1 分 29 秒 (Table 2) に比べると約 65 倍である。その理由は、3 章に示した被曝線量率の補正のためのグラフィック処理の演算に起因する。

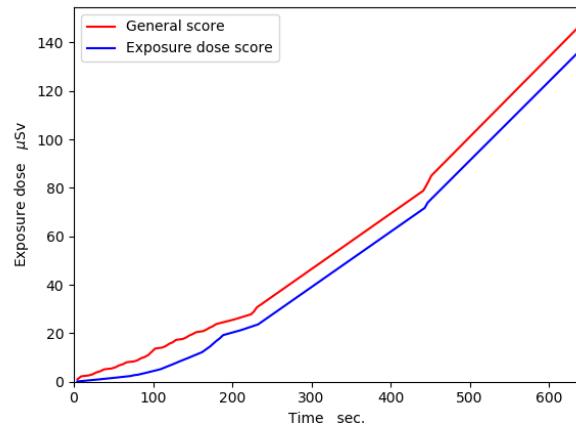


Fig.12 Exposure dose of disassembly sequence

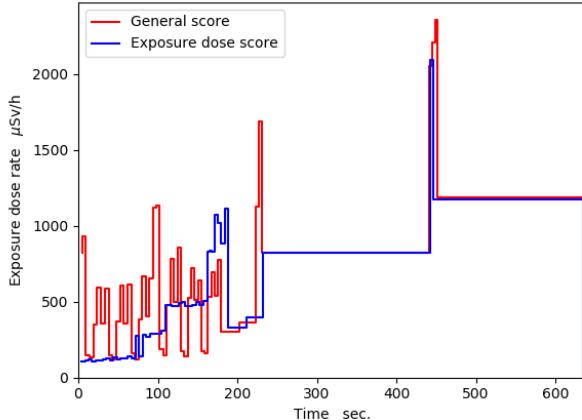


Fig.13 Exposure dose rate of disassembly sequence

5 結論

原子力プラントの廃止措置において、機器や配管の解体作業計画の効率化と作業の安全性を高めることを目的に、作業被曝線量をスコアとして最小化する準最適化探索方式を開発した。

分解作業状態の作業被曝線量率を、CG 演算処理により取得した被曝線量率を有する部品の露出表面積の百分率に基づいて補正する方式を提案した。

123 部品から構成される熱交換器の全体モデルに対し、分解作業を複数の作業単位に分割し、階層的に準最適化探索を行うことにより、同じモデルを単一の階層で処理した場合に比べ、約 10 倍の高速化となった。また、修正を要す

る部品は 6.5% と、単一の階層で処理した場合に比べ、1/7 となつた。

2つの放射性部品を含む49部品から構成される熱交換器の一部について、作業被曝線量をスコアとして求めた分解順序は、一般的な分解作業のスコアを用いて求めた分解順序に比べて、作業被曝線量を 8.2% 低減することを確認した。

本論文は、機器の分解時の作業被曝線量を最小化する分解順序の探索手法を提案した。今後は、分解に伴う切断作業も考慮した方式に改良が必要と考える。

参考文献

- [1] Seki, H. et al.: Estimation of decommissioning quantity based on 3D intelligent model. *WM2017 Conference*, Phoenix, Arizona, USA, March 5-9, 17075 (2017).
- [2] 芝原雄司 他: 原子力施設の廃止措置における大型機器解体シナリオの最適化に関する検討. 日本原子力学会和文論文誌 **12** (3), pp.197-210 (2013).
- [3] Schrijver, A.: *Combinatorial Optimization*, Vol. A, Springer, pp.38-47 (2003).
- [4] 榎本敦子 他: 分解順序先送りアルゴリズムによる組立アニメーションと3D作業指示図の高速自動生成技術の開発と実用化. 精密工学会誌 **79** (2), pp.133-137 (2013).
- [5] Rashid, M. F. F., Hutabarat, W., Tiwari, A.: A review on assembly sequence planning and assembly line balancing optimization using soft computing approaches. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **59** (1-4), pp.335-349 (2011).
- [6] Hongguang, Lv., Cong, Lu.: A discrete particle swarm optimization algorithm for assembly sequence planning. *2009 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*, IEEE, Chengdu, China, July 20-24, 2009, pp.1119-1122 (2009).
- [7] Sinanoglu, C.: Design of an artificial neural network for assembly sequence planning system. *International Journal of Industrial Engineering* **15** (1), pp.92-103 (2008).
- [8] Wang, Y., Liu, J.H.: Chaotic particle swarm optimization for assembly sequence planning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **26** (2), pp.212-222 (2010).
- [9] 榎本敦子 他: 組立アニメーションと3D作業指示図の高速自動生成のための組立順序規則と幾何拘束に基づく組立順序生成アルゴリズム. 精密工学会誌 **79** (8), pp.790-797 (2013).
- [10] Enomoto, A. et al.: Near optimal assembly sequence generation. *2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, IEEE, Sapporo, Japan, December 13-15, 2016, pp.95-101 (2016).
- [11] Kanehara, T., Suzuki, T., Inaba, A., Okumura, S.: On algebraic and graph structural properties of assembly Petri net-searching by linear programming. *Proceedings of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'93)*, Vol. 3, IEEE, Yokohama, Japan, July 26-30, 1993, pp.2286-2293 (1993).
- [12] Lambert, A. J. D.: Linear programming in disassembly/clustering sequence generation. *Computer & Industrial Engineering* **36** (4), pp.723-738 (1999).
- [13] Lambert, A. J. D.: Automatic determination of transition matrices in optimal disassembly sequence generation. *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP2001), Assembly and Disassembly in the Twenty-first Century (Cat. No. 01TH8560)*, Fukuoka, Japan, May 29th, 2001, pp.220-225 (2001).
- [14] Lambert, A. J. D.: Determining optimum disassembly sequences in electronic equipment. *Computer & Industrial Engineering* **43** (3), pp.553-575 (2002).
- [15] Schrijver, A.: *Combinatorial Optimization*, Vol. A, Springer, pp.97-98 (2003).
- [16] Johnson, D. B.: A note on Dijkstra's shortest path algorithm. *Journal of the ACM (JACM)* **20** (3), pp.385-388. (1973).
- [17] Enomoto, A., Fujii, N., Nonaka, Y., Rasch, J., Schulte, S., Engelhardt, M., Kolibabka, J., Kaneko, J., Ichijo, T., Shibuta, K.: Multiple path finding system for replacement tasks. *Procedia CIRP* **33**, pp.3-8 (2015).
- [18] Okabe, A., Enomoto, A.: Automatic route-finding with non-monotonic-trend factor for large-scale plant maintenance task. *Procedia CIRP* **41**, pp.550-555 (2016).
- [19] Miyakawa, S., Ohashi, T.: The Hitachi assemblability evaluation method (AEM). *Proceedings of the International Conference on Product Design for Assembly*, Newport, RI, USA, April 15-17, 1986, (1986).
- [20] Ohashi, T. et al.: Extended assemblability evaluation method (AEM). *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing* **45** (2), pp.567-574. (2002).
- [21] Suzuki, T., Ohashi, T., Asano, M.: Assembly reliability evaluation method (AREM). *CIRP Annals* **52** (1), pp.9-12 (2003).