

- Radiology. 1992; 183:1-11.
34. MacVicar AD, Olliff JFC, Pringle J. et al: Ewing sarcoma: MR imaging of chemotherapy-induced changes with histologic correlation. Radiology 1992; 184:859-64.
  35. Schima W, Amann G, Stiglbauer R. et al. :Preoperative Staging of Osteosarcoma: Efficacy of MR Imaging in Detecting Joint Involvement. AJR. 1994; 163:1171-5.
  36. McDonald DJ. :Limb-Salvage Surgery for Treatment of Sarcoma of the Extremities. AJR. 1994; 163:509-13.
  37. Mouloupoulos LA, Dimopoulos MA, Alexanian R. et al. :Multiple Myeloma:MR Patterns of Resonse to Treatment. Radiology. 1994; 193:441-6.
  38. van der Woude HJ, Bloem JL, Holscher HC. et al. :Monitoring the effect of chemotherapy in Ewing's sarcoma of bone with MR imaging. Skeletal Radiol. 1994; 23:493-500.
  39. Wellings RM, Davies AM, Pynsen PB. et al: The value of computed tomographic measurements in osteosarcoma as a predictor of response to adjuvant chemotherapy. Clin Radiol 1994; 49: 19-23.
  40. van der Woude HJ, Bloem JL, van Oostayen JA. et al. :Treatment of High-Grade Bone Sarcoma with Neoadjuvant Chemotherapy: The Utility of Sequential Color Doppler Sonography in Predicting Histopathologic Response. AJR. 1995; 165:125-33.
  41. Lang P, Honda G, Roberts T. et al. :Musculoskeletal Neoplasm: Perineoplastic edema versus Tumor on Dynamic Postcontrast MR Images with Spatial Mapping of Instantaneous Enhancement Rates. Radiology. 1995; 197:831-9.
  42. van der Woude HJ, Bloem JL, Verstraete KL. et al. :osteosarcoma and Ewing's Sarcoma After Neoadjuvant Chemotherapy: Value of Dynamic MR Imaging in Detecting Viable Tumor Before Surgery. AJR. 1995; 165:593-8.
  43. Kinoshita T, Tatezaki S, Matsuzoki O. et al. :Ultrasonographic monitoring of the effects of peroperative chemotherapy in osteosarcoma and Ewing's sarcoma. International Orthopaedics. 1995; 19:312-4.
  44. Lang P, Vahlensieck M, Matthay KK. et al. :Monitoring Neovascularity as an Indicator of Response to Chemotherapy in Osteogenic and Ewing Sarcoma Using Magnetic Resonance Angiography. Medical and Pediatric Oncology. 1996; 26:329-33.
  45. Soderlund V, Larsson SA, Bauer HCF. et al. :Use of <sup>99m</sup>Tc-MIBI scintigraphy in the evaluation of the response of osteosarcoma to chemotherapy. Eur J Nucl Med. 1997; 24:511-5.
  46. Kobayashi Y, Ozaki T, Takeda T. et al. :Evaluation of the effects of peroperative

- chemotherapy in bone sarcomas. *Acta Orthop Scand*. 1998; 69:611-6.
47. Ozacan Z, Burak Z, Kumanlioglu K. et al. :Assessment of chemotherapy-induced changes in bone sarcomas: Clinical experience with <sup>99</sup>Tc<sup>m</sup>-MDP three-phase dynamic bone scintigraphy. *Nuclear Medicine Communications*. 1999; 20:41-8.
  48. Ongolo-zogo P, Sau TJ, Desuzinges C. et al. :Assessment of osteosarcoma response to neoadjuvant chemotherapy: comparative usefulness of dynamic gadolinium-enhanced spin-echo magnetic resonance imaging and technetium-99m skeletal angioscintigraphy. *Eur Radiol*. 1999; 9:907-14.
  49. Khadrawy AME, Hoffer FA, Reddick WE. :Ewing's sarcoma recurrence vs radiation necrosis in dynamic contrast enhanced MR imaging: a case report. *Pediatr Radiol*. 1999; 29:272-4.
  50. Kunisada. T, Ozaki T, Kawai A. et al. :Imaging Assessment of the Responses of Osteosarcoma Patients to preoperative Chemotherapy. *CANCER*. 1999; 86:949-56.
  51. Winderen M, Stenwig AE, Solheim OP. et al. :Dynamic bone scintigraphy for evaluation of tumor response after preoperative chemotherapy. *Acta Orthop Scand(suppl 285)*. 1999; 70:11-7.
  52. Abudu A, Davies AM, Pynsent PB. et al. :Tumour volume as a predictor of necrosis after chemotherapy in Ewing's sarcoma. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 1999; 81-B:317-22.

## 悪性骨腫瘍の化学療法の治療効果判定

	検査の適正度	コメント
単純X線写真	8	
MRI	8	
RI	2	身体所見、生化学所見とMRIに解離のある場合
CT	1	
血管造影	1	
超音波	1	

## 股関節無腐性壊死の画像診断

大腿骨頭の無腐性壊死は比較的頻度の高い疾患で、その病態は骨髄の細胞成分の壊死である。無腐性壊死の前駆状態は無数にあるが、股関節脱臼、大腿骨頸部骨折、副腎皮質ホルモンの服用、膠原病、血色素症などがある。大腿骨頭の無腐性壊死は若年の成人が罹患するので保健衛生上重要な問題である。二次的に大腿骨頭が圧潰することにより、股関節の機能を奪う痛みが生じ、その結果若年成人期において全関節置換術の必要に迫られることがある。無腐性壊死の原因のうち非外傷性では、両側性の罹患が普通で障害の程度はさらに増すことになる。

無腐性壊死の診断にあたって疾患に特異的な理学所見や検査データはないので、臨床的に無腐性壊死が疑われたときに診断を確定できる方法は画像診断か生検に限られる。確定診断できる画像診断法は単純X線写真、断層撮影、コンピュータX線断層(CT)、核医学検査、磁気共鳴画像(MRI)がある。これらの方法は費用、診断の正確度、提供される情報の点でかなり違いがある。

無腐性壊死の治療法として推奨されてきたものにはCore decompression、遊離骨移植、血管柄付き骨移植、骨軟骨同種移植、骨切り術、電気刺激があるが、最適な治療法については未だに議論がされている。いずれの治療法を選択するにせよ無腐性壊死の早期診断と病期診断は以下の2つの理由により重要である。第一に患者の股関節痛の原因が無腐性壊死であると診断されれば、その他の感染、腫瘍、不顕性骨折などの特異的な治療を必要とする疾患を除外することができる。第二に無腐性壊死の正確な診断と病期診断は将来開発されるであろう治療法の有効性を判定する上で基本となるものである。

単純X線写真は最も安価で、広く普及している画像診断法である。単純X線写真は無腐性壊死が疑われた患者について最初の検査として行われるべきである。無腐性壊死の存在下で単純X線所見は、正常、疑わしいが明確ではない、明確のいずれかである。大腿骨頭の無腐性壊死のX線所見はよく知られているが、それぞれの方向の撮影について診断的有効性を検証した研究はない。多くの専門家は正面像とfrogleg側面像の両方が必要と考えている。なぜなら軟骨下骨折あるいは皮質の圧潰はいずれか一方の画像でしか認められないことがあるからである。断層撮影の価値については語られることがあるが、無腐性壊死において断層撮影の感受性、特異性を検証した研究はない。

多方向再構成を含んだCTは無腐性壊死の診断において骨シンチグラムやMRIよりも感受性は低い、正診率は単純写真と同等か優れている。CTの主な役割は二次的な変形性関節症の重傷度と大腿骨頭の圧潰の範囲を決定することにある。この情報は骨切り術や関節置換術の手術計画に役立つ。

X線写真上異常のない無腐性壊死の診断において、骨シンチグラムとMRIはいずれも感受性の高い検査である。しかしMRIの方が骨シンチグラムよりも感受性、特異性いずれも高く、優れた検査である。無腐性壊死の感受性はMRIでは88-100%であるのに対して、骨シンチグラムでは72-87%である。SPECTを加えることで骨シンチグラムの感受性は改善されるが、MRIの正診率はさらに高い。MRIが骨シンチグラムに比べてもう一つ有利な点はMR上の無腐性壊死の所見が特徴的で他の疾患と鑑別ができることである。単純X線写真上所見のない無腐性壊死でMRIあるいは骨シンチグラムが擬陰性を示す症例がある。その場合は両方の検査が行われることがある。

ハイリスクではあるが無症状のグループに対して無腐性壊死のスクリーニングを行う必要があるかどうかについては議論のあるところである。一例として高用量の副腎皮質ホルモンで治療されている場合がある。これらの患者は無腐性壊死を発症する危険性が高く、股関節痛を訴える場合はMRIが推奨されることが多い。また無腐性壊死を発症する危険性が高いが股関節痛のない患者についてMRIあるいは骨シンチグラムの評価を行った研究もある。腎移植患者で副腎皮質ホルモンを服用している患者は股関節痛がないにも関わらず無腐性壊死の頻度が高い。MRIではこれら無症状の患者の6-22%に典型的な無腐性壊死の所見がみられる。これらの無症状の患者について行われた追跡調査によれば、痛みを発症したり股関節の圧潰にまで発展する例はむしろ少数で大部分は変化がないか、正常化する例もあるという。その後の症状が発症するかどうかは人により異なる上に、どの患者に対して早期に治療的介入(intervention)を行うと有益であるかを判断することは困難である。現時点では無症候性の無腐性壊死に対する予防的治療が有益であることが証明されてはいないので、スクリーニングを正当化する根拠はない。ただいくつかの研究によりMRでみられる壊死の範囲によってその後の圧潰が予測できることがわかってきた。これらの研究から大腿骨頭の広い範囲に及ぶ無腐性壊死においては早期に治療的介入をおこなうべきであることが示唆される。将来的には大腿骨頭の圧潰を防ぐための治療法の評価研究においては治療前にMRによって壊死の範囲を評価することが求められる。

大腿骨頸部骨折患者の無腐性壊死発症の危険性が高いことはよく知られている。骨片偏位の少ない大腿骨頸部骨折患者の大部分は経験的には内固定により治療される。偏位の大きい場合はたいてい大腿骨頭置換術が行われる。骨折癒合不全や無腐性壊死のリスクが高いからである。画像診断の役割として大腿骨頸部骨折後に骨頭の血流が途絶しているか否かをみわけることがある。大腿骨頭の血流が保たれていれば骨片の偏位の大小に関わらず、内固定が大腿骨頭置換術に代わる治療法になるかもしれない。もし大腿骨頭の血流がなければ大腿骨頭置換術をすぐに行うことも可能である。虚血がおこってから48時間以内においては単純MRI、骨シンチグラムのいずれも大腿骨頭の血流を評価する有効な手段ではな

い。最近の研究ではガドリニウム造影後の MR では犬で作成された大腿骨頭壊死モデルと 13 例の大腿骨頸部骨折患者において大腿骨頭の血流を正確に測定できたと報告されている。このことが対照群を設定した研究で確認されれば、造影 MRI を大腿骨頸部骨折患者の骨頭血流評価法として推奨できる。

#### 文献

- 1, Bassett LW, Gold RH, Reicher M, et al. Magnetic resonance imaging in the early diagnosis of ischemic necrosis of the femoral head. Clin Orthop 1987;214:237-248.
- 2, Beltran J, Herman LJ, Burk JM, et al. Femoral head avascular necrosis: MR imaging with clinical-pathologic and radionuclide correlation. Radiology 1988;166.. 215.
- 3, Camp JF, Colwell CW. Core decompression of the femoral head for osteonecrosis. J Bone Joint Surg 1986;68(A):1313-1319.
- 4, Coleman BG, Kressel HY, Dalinka MK, et al. Radiographically negative avascular necrosis: detection with MR imaging. Radiology 1988;168:525-528.
- 5, Conklin JJ, Alderson PO, Zizic TM, et al. Comparison of bone scan and radiograph sensitivity in the detection of steroid-induced ischemic necrosis of bone. Radiology 1983;147:221-226.
- 6, Ficat RP. Idiopathic bone necrosis of the femoral head. J Bone Joint Surg 1985;67(A):3-9.
- 7, Fordyce MJF, Solomon L. Early detection of avascular necrosis of the femoral head by MRI. J Bone Joint Surg 1993;75(B):365.
- 8, Genez BM, Wilson MR, Houk RW, et al. Early osteonecrosis of the femoral head: detection in high-risk patients with MR imagine. Radiology 1988;168:521.
- 9, Glickstein MF, Burk DL, Schiebler ML et al. Avascular necrosis versus other diseases of the hip: sensitivity of MR imaging. Radiology 1988;169:213.

- 10, Halland AM, Klemp P, Botes D, et al. Avascular necrosis of the hip in systemic lupus erythematosus: the role of magnetic resonance imaging. *Brit J Rheum* 1993;32:972.
- 11, Hauzeur JP, Pateels JI, Schoutens A, et al. The diagnostic value of magnetic resonance imaging in non-traumatic osteonecrosis of the femoral head. *J Bone Joint Surg* 1989;71(A):641.
- 12, Kalunian KC, Hahn BH, Bassett L. Magnetic resonance imaging identifies early femoral head ischemic necrosis in patients receiving systemic glucocorticoid therapy. *J Rheum* 1989;16:959.
- 13, Kim KY, Lee SH, Moon DH, et al. The diagnostic value of triple head single photon emission computed tomography (3H-SPECT) in avascular necrosis of the femoral head. *Internat Orthop* 1993;17:132.
- 14, Kokubo T, Takatori Y, Ninomiya S, et al. Magnetic resonance imaging and scintigraphy of avascular necrosis of the femoral head: prediction of subsequent segmental collapse. *Clin Orthop* 1992;277:54.
- 15, Kopecky KK, Braunstein EM, Brandt KD, et al. Apparent avascular necrosis of the hip: appearance and spontaneous resolution of MR findings in renal allograft recipients. *Radiology* 1991;179:523.
- 16, Laffargue P, Dahan E, Chagnaud C, et al. Early-stage avascular necrosis of the femoral head. MR imaging for prognosis in 31 cases with at least 2 years follow-up. *Radiology* 1993;187:199.
- 17, Lane P, Maul M, Schorner W, et al. Acute fracture of the femoral neck: assessment of femoral head perfusion with gadopentetate dimeglumine-enhanced MR imaging. *AJR* 1993;160:335.
- 18, Lee MJ, Corrigan J, Stack JP, et al. A comparison of modern imaging modalities in osteonecrosis of the femoral head. *Clin Radiol* 1990;42:427.
- 19, Magid D, Fishman EK, Scott WW, et al. Femoral head avascular necrosis CT assessment

with multiplanar reconstruction. Radiology 1985;157:751-756.

20, Markisz JA, Knowles RJR, Altchek DW, et al. Segmental patterns of avascular necrosis of the femoral heads: early detection with MR imaging. Radiology 1987;162:717.

21, Meyer SJF, Vahey TN. Imaging algorithm for Avascular necrosis of the hip. Rheum Dis Clin North Am 1991;17:799-802.

22, Mitchell DG, Kressel HY, Arger PG, et al. Avascular necrosis of the femoral head: morphologic assessment by MR imaging, with CT correction. Radiology 1986;161:739-742.

23, Mitchell DG, Rao VM, Dalinka MK, et al. Femoral head avascular necrosis: correlation of MR imaging radiographic staging, radionuclide imaging, and clinical findings. Radiology 1987;162:709-715.

24, Mulliken BD, Renfrew DL, Brand RA, et al. Prevalence of previously undetected osteonecrosis of the femoral head in renal transplant recipients. Radiology 1994; 192:831-834

25, Nadel SN, Debatin JF, Richardson WJ, et al. Detection of acute avascular necrosis of the femoral head in dogs.. dynamic contrast-enhanced MR imaging vs spin-echo and STIR sequences. AJR 1992;159.. 1255.

26, Nagasawa K, Tsukamoto H, Tada Y, et al. Imaging study on the mode of development and changes in avascular necrosis of the femoral head in systemic lupus erythematosus: long-term observations. Brit J Rheum 1994;33:343.

27, Resnick D, Niwayama G. Osteonecrosis: diagnostic techniques, specific situations, and complications. In Resnick D, Niwayama G, ed. Diagnosis of Bone and Joint Disorders. Philadelphia: WB Saunders, 1988:3238-3287.

28, Robinson HJ, Hartleben PD, Lund G, Schreiman J. Evaluation of magnetic resonance imaging in the diagnosis of osteonecrosis of the femoral head. J Bone Joint Surg 1989; 71(A):650.



- 29, Sakamoto M, Shimizu K, Iida S, et al. Osteonecrosis of the femoral head. A prospective study with MRI J Bone Joint Surg [Br] 1997;79-B:213-9
- 30, Seiler JG, Cristie MJ, Homra L. Correlation of the findings of magnetic resonance imaging with those of bone biopsy in patients who have stage-I or II ischemic necrosis of the femoral head. J Bone Joint Surg 1989;71(A):28.
- 31, Shih TTF, Su CT, Chiu LC, et al. Evaluation of hip disorders by radiography, radionuclide scanning and magnetic resonance imaging. J Formos Med Assoc 1993;92:737-744.
- 32, Siddiqui AR, Kopecky KK, Wellman HN, et al. Prospective study of magnetic resonance imaging and SPECT bone scans in renal allograft recipients: evidence for a self-limited subclinical abnormality of the hip. J Nucl Med 1993;34:381.
- 33, Steinberg ME. Early diagnosis of avascular necrosis of the femoral head. Inst Course Lect 1988;37: 51-57.
- 34, Sweet, DE, Madewell JE. Pathogenesis of osteonecrosis. In Resnick D, Niwayama G, ed. Diagnosis of Bone and Joint Disorders. Philadelphia: WB Saunders, 1988. 3188-3237.
- 35, Takatori Y, Kokubo T, Ninomiya S, et al. Avascular necrosis of the femoral head: natural history and magnetic resonance imaging. J Bone Joint Surg 1993;75(B).. 217.
- 36, Tervonen O, Mueller DM, Matteson EL, et al. Clinically occult avascular necrosis of the hip: prevalence in an asymptomatic population at risk. Radiology 1992;182:845.
- 37, Thickman D, Axel L, Kressel HY, et al. Magnetic resonance imaging of avascular necrosis of the femoral head. Skeletal Radiol 1986;15:133-140.
- 38, Tooke SMT, Nugent PJ, Bassett LW, et al. Results Of Core decompression for femoral head osteonecrosis. Clin Orthop 1988;288:99-104.

画像検査法	適切度	コメント
骨盤正面像	9	股関節痛を訴える AVN の危険度の高い患者について最初におこなう検査
股関節の frogleg 側面像	9	大腿骨頭の前後面の評価に必要
股関節の cross table 側面像	1	軟部組織の重なるの為、細部の評価には向かない
CT	1	最初の検査としては不適切
骨シンチグラム	1	AVN の診断に有用だが、最初の検査ではない
MRI	1	AVN の診断能は最も高いが、最初の検査ではない

画像検査	適切度	コメント
MRI	9	AVN の診断において最も鋭敏度、特異度が高い
骨シンチグラム	1	MRI のない場合や MRI で陰性だが、AVN の疑いが解消できない場合に適応となる
CT	1	骨シンチグラムや MRI に比べて鋭敏度が劣る
造影 MRI	1	灌流の評価は必要ではない

## Insufficiency Fx の疑い 高齢者の骨盤痛で単純 X 線写真が正常

不全骨折とは、オステオポロシスなどにより脆弱化した骨に、正常のストレス、あるいは軽微な外傷が加わることにより起きる骨折である。外傷自体は軽微なため、患者が意識していないことも多い。仙骨不全骨折は、オステオポロシスのある高齢者の腰痛、骨盤痛の原因として重要なものである。この骨折は、婦人科の悪性腫瘍により放射線治療を受けた例に好発し、そのような例では、臨床的には転移性骨腫瘍との鑑別が問題になる。仙骨の不全骨折の臨床診断は、発症時期がはっきりしないこと、単純 X 線では所見がなく、脊椎変性のため腰椎と誤診されやすいこと、などによりその臨床診断は必ずしも容易ではない。恥骨の不全骨折も骨盤痛の原因となるが、これは主に鼠形部から股関節に痛みを生じるが、同時に仙骨不全骨折を合併して、骨盤痛を訴えることがある。仙骨不全骨折の診断には、画像診断が重要であるが、単純 X 線写真による診断は困難である。

骨シンチグラムは、仙骨不全骨折の診断に非常に有用である。骨シンチグラムで仙骨翼に一致する H 字形の集積を示す場合が多く、この所見は非常に特徴的で、これだけでも診断はほぼ確定する。

CT は、仙骨不全骨折の確定診断に有用で、多くの研究からは CT が最も診断的であるとされている。CT では、仙腸関節のガス像 (Vacuum phenomenon) や仙骨骨折内にガスが証明されることもある。CT は、骨シベキ検査法である。

MRI は、骨折自体ではなく、骨折に伴う骨髄や軟部組織の評価に有用であり、またその所見から、X 線検査ではわからない骨折を診断できる。また、骨シンチグラムと比較しても、骨シンチグラムでは異常集積のない早期 (24 時間以内) に骨折の診断が可能である。不全骨折に伴う骨髄の異常信号は必ずしも特異的な所見ではない。鑑別診断として転移性腫瘍が最も問題になるが、信号の分布や病歴から他の疾患と間違われることは少ない。MRI で不全骨折が疑われる患者、特に高齢者では、仙骨不全骨折以外にも、骨や軟部組織の損傷を伴う場合が多い。MRI により仙骨を含む骨盤全体の骨折や軟部組織損傷を診断する事ができる。

単純X線写真正常

検査法	点数	コメント
骨シンチグラム	9	特徴的パターンあり
CT	9	診断的検査法
MRI	3	軟部組織損傷を含め、骨盤全体の評価可能

文献

(1-19)

1. Moreno A, Clemente J, Crespo C, Martinez A, Navarro M, Fernandez L, et al. Pelvic insufficiency fractures in patients with pelvic irradiation. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1999;44(1):61-6.
2. Peh WC, Ooi GC. Vacuum phenomena in the sacroiliac joints and in association with sacral insufficiency fractures. Incidence and significance. *Spine* 1997;22(17):2005-8.
3. Grangier C, Garcia J, Howarth NR, May M, Rossier P. Role of MRI in the diagnosis of insufficiency fractures of the sacrum and acetabular roof. *Skeletal Radiol* 1997;26(9):517-24.
4. Peh WC, Khong PL, Yin Y, Ho WY, Evans NS, Gilula LA, et al. Imaging of pelvic insufficiency fractures. *Radiographics* 1996;16(2):335-48.
5. May DA, Purins JL, Smith DK. MR imaging of occult traumatic fractures and muscular injuries of the hip and pelvis in elderly patients. *AJR Am J Roentgenol* 1996;166(5):1075-8.
6. Grasland A, Pouchot J, Mathieu A, Paycha F, Vinceneux P. Sacral insufficiency fractures: an easily overlooked cause of back pain in elderly women. *Arch Intern Med* 1996;156(6):668-74.
7. Blomlie V, Rofstad EK, Talle K, Sundfor K, Winderen M, Lien HH. Incidence of radiation-induced insufficiency fractures of the female pelvis: evaluation with MR imaging. *AJR Am J Roentgenol* 1996;167(5):1205-10.
8. Stabler A, Beck R, Bartl R, Schmidt D, Reiser M. Vacuum phenomena in insufficiency fractures of the sacrum. *Skeletal Radiol* 1995;24(1):31-5.
9. Peh WC, Khong PL, Ho WY, Yeung HW, Luk KD. Sacral insufficiency fractures.

Spectrum of radiological features. Clin Imaging 1995;19(2):92-101.

10. Mammone JF, Schweitzer ME. MRI of occult sacral insufficiency fractures following radiotherapy. Skeletal Radiol 1995;24(2):101-4.
11. West SG, Troutner JL, Baker MR, Place HM. Sacral insufficiency fractures in rheumatoid arthritis. Spine 1994;19(18):2117-21.
12. Gotis-Graham I, McGuigan L, Diamond T, Portek I, Quinn R, Sturgess A, et al. Sacral insufficiency fractures in the elderly. J Bone Joint Surg Br 1994;76(6):882-6.
13. Weber M, Hasler P, Gerber H. Insufficiency fractures of the sacrum. Twenty cases and review of the literature. Spine 1993;18(16):2507-12.
14. Blomlie V, Lien HH, Iversen T, Winderen M, Tvera K. Radiation-induced insufficiency fractures of the sacrum: evaluation with MR imaging. Radiology 1993;188(1):241-4.
15. Lundin B, Bjorkholm E, Lundell M, Jacobsson H. Insufficiency fractures of the sacrum after radiotherapy for gynaecological malignancy. Acta Oncol 1990;29(2):211-5.
16. Brahme SK, Cervilla V, Vint V, Cooper K, Kortman K, Resnick D. Magnetic resonance appearance of sacral insufficiency fractures. Skeletal Radiol 1990;19(7):489-93.
17. Cotty P, Fouquet B, Mezenge C, De Toffol B, Beaulieu F, Valat JP, et al. Insufficiency fractures of the sacrum. Ten cases and a review of the literature. J Neuroradiol 1989;16(2):160-71.
18. De Smet AA, Neff JR. Pubic and sacral insufficiency fractures: clinical course and radiologic findings. AJR Am J Roentgenol 1985;145(3):601-6.
19. Cooper KL, Beabout JW, Swee RG. Insufficiency fractures of the sacrum. Radiology 1985;156(1):15-20.

平成 12 年度厚生科学研究費補助金（医薬安全総合研究事業）  
「医療機関における使用済線源及び診療用放射性同位元素の  
管理の合理化等のあり方に関する研究」

分担研究課題

使用済放射線源及び診療用放射性同位元素の合理的な廃棄方策の研究

分担研究者	浜田達二	日本アイソトープ協会 顧問
	遠藤啓吾	群馬大学医学部核医学教室 教授
	佐々木康人	放射線医学総合研究所 所長
	古賀佑彦	藤田保健衛生大学医学部放射線医学教室 教授
	青木幸昌	東京大学医学系研究科放射線医学講座 助教授
	菊地 透	自治医科大学 R I センター 管理主任
	小西淳二	京都大学大学院医学研究科 教授
	佐々木武仁	東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科 教授
	山下 孝	(財) 癌研究会附属病院放射線科 部長
	土器屋卓志	国立病院東京医療センター放射線科 医長
	平松慶博	東邦大学医学部附属大橋病院第二放射線科 教授
	今村恵子	聖マリアンナ医科大学病院画像診断センター 副部長
	高田 稔	(社) 日本アイソトープ協会医薬品部 部長
	須藤幸雄	(社) 日本アイソトープ協会業務二課 課長
	萩原一男	(社) 日本アイソトープ協会医薬管理課 課長

研究要旨

医療機関における放射性物質管理の合理化の一環として、放射性廃棄物（使用済線源を含む）の処理・処分に係る合理的規制方法の策定に資するため、14 名の研究協力者からなるワーキンググループを設け、国内及び国際的な動向も考慮しつつ、研究を実施した。

A. 研究目的

放射性廃棄物の処理・処分に係る合理化の気運及び国際放射線防護委員会 1990 年勧告と国際原子力機関の基本安全基準 (BSS, 1996) に現れた動向に関連して、とくに医療機関における放射性固体廃棄物の処理・処分を取り上げて考察し、合理的規制方法の策定に資することを目的とする。

B. 研究方法

わが国の医療分野における放射性固体廃棄物管理の現状、原子炉等規制法の規制を受け

る事業所からの放射性固体廃棄物の処理・処分に関する先行例、国際勧告及び国際基準との整合を考慮しつつ、医療放射性廃棄物の合理的な処理・処分のあり方についての考察を行った。

## C. 研究結果

### 1. 放射性固体廃棄物処分の基本的考え方

#### 1.1 放射性固体廃棄物のカテゴリーと処分の方法

わが国では現在、放射性固体廃棄物を、その放射能レベルに従って、高レベルと低レベルの2つのカテゴリーに大別している。これらはそれぞれ次のようなものである：

高レベル廃棄物：使用済核燃料の再処理によって発生する高レベル廃液を固形化したもの

低レベル廃棄物：上記以外の廃棄物。現在このカテゴリーに含まれているのは、動力炉の運転に伴って発生する廃液を固形化したもの、汚染又は放射化されたコンクリート、金属、雑固体、焼却灰等である。

この分類は、いわゆる浅地中（深さ30m以浅）及びそれより若干深い（50～100m）場所への埋設によって処分できるものと、もっと深い、いわゆる地層処分を必要とするものとの、地中処分の深さに主として基づいた分類である。

以上の分類のほか、廃棄物の発生源及び廃棄物に含まれる核種による別の分類もある。すなわち：

動力炉の運転廃棄物：上記低レベル廃棄物の項を参照

TRU 廃棄物：超ウラン元素を含む、再処理施設等からの廃棄物

ウラン廃棄物：ウラン燃料加工施設等からの廃棄物

研究所廃棄物：研究炉、核燃料物質の研究的取扱施設からの廃棄物

R I 廃棄物：核燃料・核原料物質以外の一般R Iの使用施設からの廃棄物  
(医療機関からの廃棄物はこれに含まれる)

これらのうち、研究所・R I 廃棄物は、ある種の密封線源を除き、低レベル廃棄物に属すると考えてよい。一方、TRU 廃棄物及びウラン廃棄物は、放射能レベルが高い場合には、浅地中処分を適用できないケースもありうる。

#### 1.2 放射性廃棄物処分の基本的な考え方

処分の基本的考え方は、廃棄物のコンクリート固化及びコンクリートピットへの埋設といったいわゆる人工バリアと、埋設箇所から敷地境界までの土などのいわゆる天然バリアを利用し、ある期間管理下に置くことによって放射能を減衰させ、放射能レベルが十分下がったところで管理を解く、という、「減衰待ち」の考え方である。それに対し、TRU やウランのように実際上減衰が期待できない核種が主成分を占める廃棄物については、上のような考え方は適用できないので、たとえば有害重金属を含む廃棄物に対するような違った考え方に基づかなければならないが、その検討はまだ済んでいない。

#### 1.3 処分場の操業中及び閉鎖後の管理と基準線量

埋設処分場の操業中に行われる作業には、廃棄体（埋設のために形を整えられた廃棄物、



例えばセメントなどで固形化された廃棄物を収納したドラム缶)の運搬、検認、及び埋設があり、運搬には車両運搬規則等が適用される。検認及び埋設は管理区域の中で行われるので、場所及び人に対し一般の放射線施設と同様の管理が要求される。通常は密封された放射性物質に対する管理でよいが、検認の際に内容物の漏洩又はそのおそれが発見されたならば、非密封放射性物質に対する管理も必要になりうる。

処分場が満杯になり閉鎖された後は、放射能の減衰に応じて管理を次第に軽減する。そのやり方については後で述べる。

最終的に管理期間が終了すると、施設が周辺公衆に与える線量の評価値は規制免除線量以下となり、処分場は法令上無管理で開放されてよいことになる。しかし、規制免除線量以下とはいえ、それで社会が納得するかどうかは別であり、また「永久管理」すなわち記録の保存と標識を要求する「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」との不整合の問題も残る。

放射性物質の運搬、管理区域の設定、管理区域内で作業する放射線業務従事者、周辺監視区域境界などには線量限度又は基準線量が法令ですでに定められている。また、管理期間を終了するためには、周辺公衆の受ける線量の評価値が規制免除線量である  $10 \mu\text{Sv/y}$  以下になることが原子力安全委員会の審査指針で要求されている。

## 2. わが国における処分の状況

### 2.1 法令等の準備

放射性固体廃棄物はそれを発生する事業所を規制する法令によって管理方法が定められている。すなわち

法令	規制される事業所
核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（原子炉等規制法）	原子炉、核燃料・核原料物質を扱う事業所
放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（放射線障害防止法）	核燃料・核原料物質及び放射性医薬品以外の放射性物質（一般R I）を扱う事業所
医療法、薬事法	診療用放射性同位元素を扱う事業所
臨床検査技師、衛生検査技師等に関する法律	検体検査用放射性同位元素を扱う事業所

これらの法令のうち、廃棄物処分の規定が定められているのは現在のところ原子炉等規制法のみである。しかし、同法で実際に規制するのは核燃料・核原料物質はかりでなく、たとえば原子炉の運転によって発生する一般R I も含まれていることに注意する必要がある。下北あるいは東海で現在処分されている廃棄物中には、核燃料・核原料物質はほとんど存在せず、含まれているのはそれ以外の放射性核種である。

原子炉等規制法ではいわゆる浅地中埋設が可能な低レベル廃棄物に対する埋設の事業と、高レベル廃棄物を主として指向した廃棄物管理の事業の二つが定められている。このうち、高レベル廃棄物は使用済燃料再処理施設からのものに事実上限られるので、ここでは低レベル廃棄物のみに着目して述べる。

法律には放射性廃棄物埋設の事業、施行令には埋設の許可申請のスクリーニングレベルとしての「政令濃度上限値」、規則及び告示には手続きや技術上の諸基準が定められている。政令濃度上限値についてはあとで述べるが、このような数値が施行令という法令上高いレベルで定められているということは、浅地中埋設が可能な「低レベル廃棄物の範囲」をしっかりと定め、いかなる場合でも高レベル廃棄物が浅地中に埋設されることがないようにする、という基本方針の現れと解することができる。

原子炉等規制法では低レベル放射性廃棄物の埋設が規定され、すでに動力炉の運転廃棄物の一部については下北で、また研究という位置づけではあるが、動力実験炉のコンクリート廃材について東海で実施されている。これらの廃棄物には核燃料物質以外の一般R Iが含まれており、したがって今後策定される障害防止法及び医療法等の廃棄物処分の規定においてはこの先行例と特に異なったやり方を採用する理由はありえないであろうと考えられる。

## 2.2 政令濃度上限値

原子炉等規制法施行令に定められているいわゆる政令濃度上限値は、廃棄体の性状や含有する放射性核種と放射能の相違による埋設方法の技術上の違いを考慮して、廃棄体の種類ごとに定められている。現在すでに定められているのは次の通りである：

- 容器に固形化されたもの
- 容器に入らない大型金属
- コンクリート廃材

政令濃度上限値は、原子炉施設において発生する核分裂生成物及び放射化生成物のうち、被ばく評価上重要な核種を選び、立地条件のよいサイトと適切な埋設規模で埋設を行った場合において、処分場を閉鎖するまでの各種作業における作業員の被ばく線量と周辺公衆の被ばく線量がそれぞれの線量限度を超えず、また管理期間終了後においては、人工バリアの機能が喪失したと仮定したとき公衆が受ける可能性のある年線量の推定値が規制免除線量  $10 \mu \text{Sv/y}$  を超えないという条件を満足するように設定されている。政令濃度上限値の例を表1に示す。

前述したように濃度上限値は許可申請ができるためのスクリーニングレベルであり、埋設しようとする廃棄体の放射能濃度がこの値を下回ったからといって埋設が可能になるわけではない。実際の許可申請にあたっては、行政庁（原子炉等規制法事業所の場合は、さらに原子力安全委員会）の安全審査があり、当該サイト条件等を考慮して、改めて埋設を許される核種濃度が決められる。その値は、当然、濃度上限値と等しいかまたはそれを下回る。

## 2.3 埋設の技術基準

埋設の技術基準は、埋設施設と廃棄体についてそれぞれ規則及び告示に定められている。

それらの概要は以下の通りである：

表1 政令濃度上限値の例

廃棄体の種類	H-3	C-14	Co-60	Ni-63	Sr-90	Cs-137	α放出体
容器に固化化* 及び大型金属	—	37 GBq/t	11.1 TBq/t	1.11 TBq/t	74 GBq/t	1.11 TBq/t	1.11 GBq/t
コンクリート 廃材**	3.0 GBq/t	110 MBq/t	8.1 GBq/t	7.2 GBq/t	4.7 MBq/t	100 MBq/t	17 MBq/t

\* コンクリートピット中に入れて埋設し、400年の管理期間終了後に人工バリアがすべて失われたとして公衆の線量を計算。

\*\*袋に入れて素ぼりトレンチに埋設し、50年間管理を続けるとして計算。

中性子で放射化されたコンクリート廃材については、別の値が定められている。

#### 埋設の技術基準

- ①埋設された核種と数量が申請書の値を超えないこと；
- ②埋設場所に溜まった水の排除と、雨水の侵入の防止；
- ③容器に封入されていない場合は、粉塵の発生の防止；
- ④埋め戻しのさい空隙を残さないこと；
- ⑤爆発性及び腐食性物質の埋設の禁止；
- ⑥埋設を終了した埋設地の表面を、周辺の土砂より透水性の大きくない土砂等で覆うこと；
- ⑦上に定めるほか、申請書に記載した構造・設備を有すること。

コンクリートピット（法令上は外周仕切設備という）中に廃棄体を入れる場合、寸法、構造耐力、腐食防止等について別に要件がある。

#### 廃棄体の技術基準

- ①固化は告示に定める方法で行うこと；
- ②放射能濃度が申請書の値を超えない事；
- ③放射性物質表面密度が限度の1/10を超えないこと；
- ④廃棄体の健全性を損ねる物質（告示に示す、爆発性、揮発性、自然発火性、腐食性、及び多量にガスを発生させる物質）を含まないこと；
- ⑤埋設された場合の耐荷重性；
- ⑥著しい破損がないこと；
- ⑦放射能標識、整理番号等の表示。

容器に入らない大型金属廃棄体に対しては、②から⑦を準用。また、非固化コンクリート廃棄物に対しては、②のほか、申請書記載事項と照合できる措置をとる。

ここに示した技術基準の特色は、固型化やコンクリートピットの技術基準は定められているが、廃棄体の性状や含有する核種・放射能がまちまちであることを考慮し、廃棄物を容器に固型化するかどうか、コンクリートピットに入れるかどうか、などの選択は事業者の裁量に任されていることである。その裁量の妥当性は申請の審査段階で審査される。

## 2.4 段階管理

現在浅地中埋設の対象となっている廃棄物はその主成分が比較的短寿命の核種であり、放射能の時間による減衰が期待できるので、数 10 ないし数 100 年の管理期間中に漸次管理を軽減し、最終的に管理を解いても公衆に問題となるような線量を与えない、というのがその基本的な安全確保の考え方である。

このいわゆる段階管理のやり方は、現在のところコンクリートピット内に固型化されたドラム缶等を入れ、埋設して、300-400 年程度の管理期間を見込む下北方式と、原子炉の解体等で大量に発生する極低レベルのコンクリート等を素掘りのトレンチに埋設し、30-50 年程度管理する東海方式との二通りがあり、それぞれを下に示す。ここに見られるように、東海方式には人工バリアがなく、埋設後ただちに漏出が起りうるので、その管理方式が少し違っている。

なお、上の段階から下の段階へ移るさいには、その都度、許可が必要である。

表 2 段階管理

下北方式（容器に固型化された、比較的放射能レベルの高い廃棄体）

第 1 段階：人工バリアから外への放射性物質の漏出の防止と監視

第 2 段階：人工及び天然バリアによる放射性物質の生活環境への移行の抑制と移行の監視

第 3 段階：主として天然バリアによる放射性物質の生活環境への移行の抑制と、特定行為（たとえば埋設地への立入など）の禁止又は制約

東海方式（容器に固型化されない、極低レベルのコンクリート廃材）

埋設段階：放射性物質の生活環境への移行の抑制と監視

保全段階：天然バリアによる放射性物質の生活環境への移行の抑制と、特定行為の禁止又は制約

## 2.5 処分の現況

現在わが国の法令で放射性廃棄物処分の規定があるのは原子炉等規制法のみであり、したがって、処分できるのは原子力事業所から発生する低レベル固体廃棄物に限られている。

埋設の事業の許可を持っている事業所は、日本原燃（株）と日本原子力研究所の二つで、日本原燃の廃棄物埋設センターでは、わが国の軽水型動力炉施設から発生する樹脂再生廃液を固化した均質固化体、定検時などに発生する汚染した衣類、機械部品、ウェスなどの