



中华人民共和国国家标准

GB/T 17567—2009
代替 GB 17567—1998

核设施的钢铁、铝、镍和铜再循环、 再利用的清洁解控水平

Clearance levels for recycle and reuse of steel, aluminum,
nickel and copper from nuclear facilities

2009-03-13 发布

2009-11-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 清洁解控	2
附录 A (资料性附录) 计算情景、模式和参数	5
附录 B (资料性附录) 不同废金属再循环、再利用中的限制性步骤、照射途径、总有效剂量和 推导的活度浓度	20

前 言

本标准代替 GB 17567—1998《核设施的钢铁和铝再循环再利用的清洁解控水平》。

本标准与 GB 17567—1998 相比,主要改变如下:

- 增加了关于镍和铜再循环再利用的清洁解控水平;
- 对原标准中钢铁中 6 种核素 (^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am), 铝中 3 种核素 (^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am) 的再循环再利用清洁解控水平作了修订;
- 对某些通用名词术语按 GB 18871—2002 作了修订;
- 删除原 4.3.2 的“不得用作医用”的内容;
- 增加了进出口物料经熔炼后再利用一条。

本标准的附录 A 和附录 B 是资料性附录。

本标准由中国核工业集团公司提出。

本标准由全国核能标准化技术委员会(SAC/TC 58)归口。

本标准起草单位:中国原子能科学研究院、群星集团公司。

本标准主要起草人:夏益华、王锐兵、李夏、冷瑞平、崔宪。

本标准所替代标准的历次版本发布情况为:

- GB 17567—1998。

核设施的钢铁、铝、镍和铜再循环、 再利用率清洁解控水平

1 范围

本标准规定了核设施运行和退役中产生的钢铁、铝、镍和铜材料、设备和工具再循环再利用率清洁解控水平。

本标准适用于核设施运行和退役中产生的钢铁、铝、镍和铜材料、设备和工具的再循环、再利用率。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

实践 practice

以物料移出需要实施管理控制的区域边界(如一个核厂址的边界)作为起点的一组活动，包括可以导致关键组(或几个关键组)受照的所有作业、操作和利用。

3.2

物料 material

拟再循环、再利用率低水平放射性核素污染的钢铁(含不锈钢，下同)、铝、镍、铜材料、设备和工具，在本标准的剂量评价中也可统称为源。

3.3

清洁解控 clearance

审管部门按规定解除对已批准进行的实践中的放射性物料的管理控制。

3.4

清洁解控水平 clearance levels

审管部门规定的、以活度浓度和(或)总活度表示的值，辐射源(物料)的活度浓度和(或)总活度等于或低于该值时，可以不再受审管部门的审管。

3.5

核设施 nuclear facility

以需要考虑安全问题的规模生产、加工或操作放射性物质或易裂变材料的设施(包括其场地、建(构)筑物和设备)，如铀富集设施，铀、钚加工与燃料制造设施，核反应堆(包括临界和次临界装置)，核动力厂，核燃料后处理厂等核燃料循环设施。

3.6

再循环、再利用率 recycle and reuse

体污染等于或低于标准给出的清洁解控水平的钢铁、铝、镍和铜物料经审批并经熔炼后作为原材料

利用;表面污染的上述物料,其表面污染水平等于或低于标准给出的表面污染解控水平的可按要求解控再利用。

4 清洁解控

4.1 清洁解控原则

轻微污染的钢铁、铝、镍和铜物料,若符合下列原则,即可解除核审管体系对其的控制:

- a) 解控后再循环、再利用所产生的个人危险足够低,以致于不值得继续加以管理;
- b) 解控所产生的集体辐射危险足够低,以至于在常见情况下施加(或继续施加)管理控制是不值得的,或者包括管理控制的代价在内的优化分析表明,任何合理的管理几乎已不可能使防护水平得到进一步改善;
- c) 解控是以其固有安全性为基础的,因此出现上述两项原则失效的可能性是极小的。

4.2 清洁解控的剂量准则

本标准中采用下列剂量判据作为实施解控的依据:

- a) 一年实践使相关人员及公众成员个人受到的有效剂量预计在 10 μSv 量级或更低的水平;
- b) 一年实践所产生的集体剂量不超过 1 人·Sv 的水平,或者防护最优化分析表明,解控是最优的选择。

4.3 清洁解控水平

应根据拟解控的钢铁、铝、镍和铜物料的来源,应分清其剩余污染是表面污染还是体(包括活化)污染。

4.3.1 对于确认仅属于表面污染的钢铁、铝、镍和铜物料,当其表面污染水平等于或低于 GB 18871—2002 附录 B 的 B.2.1、B.2.2 和表 B.11 中关于可解控的物体表面放射性物质污染控制水平(控制区控制水平的五分之一)或审管部门审定的其他水平时,经审管部门同意后,可以直接实施解控,作为普通物品使用。表面污染控制水平见表 1。

4.3.2 对于确认属于体(包括活化)污染的钢铁、铝、镍和铜物料,凡是其活度浓度等于或低于表 2、表 3、表 4 和表 5 给出的清洁解控水平或审管部门审定的其他水平时,经审管部门同意后,可解控使用。推算清洁解控水平时所采用的计算情景、模式和参数见附录 A。

4.3.3 为了防止污染热点的存在,所有污染测量均应按相关质保要求进行,应保证满足其样品代表性和数量统计性的要求。一批物料中的质量活度浓度最大测量值一般不能超过总体平均值的 10 倍。

4.3.4 作为一种校核性指标,再循环后上述四种物料中的质量活度浓度应满足表 2~表 5 的清洁解控水平。

4.4 申报和审批

拟解控物料的所有者,应按本标准的要求或审管部门的其他要求申报解控。审管部门有权对整个过程中进行抽样测量和验核。

4.5 多种核素体污染的物料的解控

在一般情况下,污染核素可能是若干种核素的混合,此时可根据式(1)判断该物料是否容许经熔炼后解控:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{i0}} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

C_i ——放射性核素 i 在所考虑物料中的活度浓度,单位为贝可每克(Bq/g);

C_{i0} ——放射性核素 i 在物料中的清洁解控水平,单位为贝可每克(Bq/g);

n ——物料中放射性污染核素的种类数。

4.6 非辐射危害方面的解控要求

上述物料的放射性污染水平对于本标准解控要求的满足,并不能替代其仍然应满足的其他方面的相关管理要求。

4.7 对于涉及进出口物料的解控,凡属于再循环、再利用的物料,可按本标准要求执行。

表 1 物料的表面污染控制水平

(根据 GB 18871—2002 中 B. 2. 1、B. 2. 2 和表 B. 11) 单位为贝可每平方米

α 放射性物质		β 放射性物质
极毒性	其他	
0.08	0.8	0.8
注 1: 表中所列数值系指表面上固定污染和松散污染的总数。 注 2: 表面污染水平超过表中所列数值时,应采取去污措施。 注 3: β 粒子最大能量小于 0.3 MeV 的 β 放射性物质的表面污染控制水平,可为表中所列数值的 5 倍。 注 4: ^{227}Ac 、 ^{210}Pb 、 ^{228}Ra 等 β 放射性物质,按 α 放射性物质的表面污染控制水平执行。 注 5: 氟和氟化物的表面污染控制水平,可为表中所列数值的 10 倍。 注 6: 表面污染水平可按一定面积上的平均值计算。		

表 2 污染钢铁再循环、再利用的清洁解控水平值

核素	^{54}Mn	^{55}Fe	^{60}Co	^{63}Ni	^{65}Zn	^{90}Sr	^{94}Nb
解控水平/ (Bq/g)	4×10^{-1}	1×10^4	1×10^{-1}	1×10^4	6×10^{-1}	9×10^1	2×10^{-1}
核素	^{99}Tc	^{137}Cs	^{152}Eu	^{239}Pu	^{241}Pu	^{241}Am	$^{238}\text{U}^*$
解控水平/ (Bq/g)	2×10^3	5×10^{-1}	4×10^{-1}	3×10^{-1}	1×10^1	3×10^{-1}	4.0×10^0
* 只包括 ^{234}Th 和 ^{234}Pa 两个短寿命子体。							

表 3 污染铝再循环、再利用的清洁解控水平值

核素	^{54}Mn	^{55}Fe	^{60}Co	^{63}Ni	^{65}Zn	^{90}Sr	^{94}Nb
解控水平/ (Bq/g)	1×10^0	2×10^3	3×10^{-1}	4×10^4	2×10^0	2×10^2	5×10^{-1}
核素	^{99}Tc	^{137}Cs	^{152}Eu	^{239}Pu	^{241}Pu	^{241}Am	$^{238}\text{U}^*$
解控水平/ (Bq/g)	9×10^3	1×10^0	1×10^0	1×10^0	7×10^1	2×10^0	2×10^1
* 只包括 ^{234}Th 和 ^{234}Pa 两个短寿命子体。							

表 4 污染镍再循环、再利用的清洁解控水平值

核素	^{54}Mn	^{55}Fe	^{60}Co	^{63}Ni	^{65}Zn	^{90}Sr	^{94}Nb
解控水平/ (Bq/g)	2×10^0	8×10^4	6×10^{-1}	2×10^5	3×10^0	1×10^3	9×10^{-1}
核素	^{99}Tc	^{137}Cs	^{152}Eu	^{239}Pu	^{241}Pu	^{241}Am	$^{238}\text{U}^*$
解控水平/ (Bq/g)	4×10^4	2×10^0	2×10^0	7×10^0	4×10^2	9×10^0	1×10^2
* 只包括 ^{234}Th 和 ^{234}Pa 两个短寿命子体。							

表 5 污染铜再循环、再利用的清洁解控水平值

核素	⁵⁴ Mn	⁵⁵ Fe	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	⁶⁵ Zn	⁹⁰ Sr	⁹⁴ Nb
解控水平/ (Bq/g)	7×10 ⁰	5×10 ⁴	2×10 ⁰	7×10 ⁴	1×10 ¹	4×10 ²	4×10 ⁰
核素	⁹⁹ Tc	¹³⁷ Cs	¹⁵² Eu	²³⁹ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴¹ Am	²³⁸ U*
解控水平/ (Bq/g)	9×10 ³	9×10 ⁰	9×10 ⁰	1×10 ⁰	7×10 ¹	2×10 ⁰	2×10 ¹
* 只包括 ²³⁴ Th 和 ²³⁴ Pa 两个短寿命子体。							

附录 A
(资料性附录)
计算情景、模式和参数

A.1 钢铁再循环、再利用

A.1.1 基本假定

钢铁的再循环再利用全过程包括的主要受照情景有：废金属运输、废金属处理、熔化冶炼、钢材消费品的利用、钢渣利用、尾气排放。

对钢铁的回收利用导出的清洁解控水平是基于下述基本假定：

- 每种放射性核素在金属回收利用过程中，在金属铸件、熔渣和废气中的比额并非严格确定。因而假定它们全部进入钢锭、全部进入钢渣或全部进入到废气等；
- 废金属的熔炼和制造过程中，未经非放射性材料稀释；
- 熔炼 1 t 钢产生约 100 kg 钢渣。

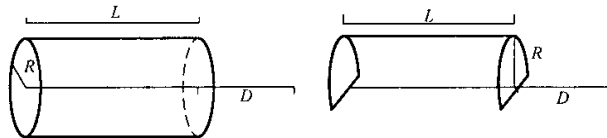
A.1.2 钢铁再循环、再利用的照射情景

A.1.2.1 要点描述

各个步骤的照射情景列于表 A.1，其分别描述如下：

a) 装卸工 1 和 2：

对于废钢铁、工业产品或最后产品均用卡车装与卸。对钢铁，总共考虑五种装卸情景。有两种不同外照射条件的照射情景：小熔炉和大熔炉。一般指利用自动装卸设备(如起重机)，一般由 2 个或 5 个装卸工，随操作不同，其受照时间为 2 h~20 h。对外照射，源概化为圆柱型或半圆柱型(见图 A.1)，废钢铁概化为 25 t，长度为 253 cm，半径为 127 cm 的半圆柱型，与工作人员的距离平均为 4 m。



L ——圆柱体长；

R ——半径；

D ——在圆柱体轴线上受照位置 A 距端面距离。

图 A.1 圆柱体和半圆柱体源示意图

b) 卡车司机 1 和 2：

指运送废钢铁和最后产品的卡车司机。对钢铁，卡车司机共有三种受照情景，即运输废钢铁、钢锭和产品。按照受照几何条件其又可分为运废钢铁，及运钢锭和产品两类。每种情景假定有 5 名司机，其受照时间在 4 h~8 h。从外照射来讲，卡车中材料概化为 20 t，长度 900 cm，半径为 60 cm 的半圆柱体，司机与源的平均距离为 2 m。

c) 处理工：

指废钢铁送入熔炉之前的各种处理工作，包括：破碎、切割、粉碎，废钢的整理、捆扎等。三种处理估计受照时间均为 12 h。对外照射，源为 0.5 t 的半圆柱体，长 60 cm，半径 30 cm，距离平均为 2 m。

d) 工人 1、2 和 3：

有三种情景描述在熔炼、制造和分配设施中的各种操作。假定这些工人是处在储存场所或货栈内。人数为 5 人~10 人，受照时间为 40 h~2 000 h(由具体的循环步骤而定)。工人 1 用于描述在熔炉厂房

内的条件。外照模式是1个100 t的废钢铁堆,其长度为351 cm,半径为175 cm,人距堆的距离为10 m。工人2用于描述钢制备厂房内的工作,外照模式为10 t半圆柱的钢锭堆,长100 m,半径201 cm,距离10 m。工人3用于描述货栈工人分发消费品的活动。外照模式是6个半圆柱形的产品,其厚度为1.2 cm,半径138 cm,距离6 m。

e) 操作工1和2:

两种炉前工的操作情景用于描述小型熔炼炉(10 t)和大型熔炼炉(100 t)的两种典型的工作条件。并假定对小炉子,3名操作工工作50 h,对大炉子,3名操作工工作5 h,两种炉子熔炼100 t钢。外照条件对第一种工人是100 t全圆柱形炉子(装料),长253 cm,半径127 cm,距离为3 m;对第二种工人是10 t圆柱炉子(装料),长117 cm,半径59 cm,距离3 m。

f) 铸工1、2和3:

铸工情景用于描述在小型和大型熔炉上浇铸大块钢锭的条件,以及在小型熔炉浇铸小物件的条件。小物件假定是工业产品或消费产品(如炒锅)。假定2名铸工(铸工2)在小型炉工作25 h,以及铸工1在大炉上浇铸10 t钢锭(2.5 h)。在小炉子,2名铸工(铸工3)假定用50 h去浇铸100 t的小物件,前两类铸工假定操作大钢锭,外照射采用一个10 t的全圆柱模式,长100 cm,半径64 cm,人距源1.5 m。第三类铸工假定是操作小物件,外照模型为1 t的全圆柱,厚度1 cm,半径201 cm,距离1 m。

g) 钢渣操作工:

假定照射条件为操作100 t熔炉再循环钢所产生的钢渣。假定10名工人在熔炉上操作钢渣25 h。钢渣中核素含量假定是10 Bq/g(假定10%的初始装炉量转化为钢渣,并假定所有核素浓缩在钢渣中)。外照模型是1个100 t的半圆柱渣堆,长455 cm,半径228 cm,距离1.5 m。

h) 钢板操作工:

描述操作薄板钢材的工作条件(或者是制备或分管工作)。假定有15~20名工人,工作时间为1 h~20 h。外照模型为47 kg的半圆柱体,厚0.2 cm,半径138 cm,操作工距源1 m。

i) 卷板工:

描述操作薄板钢的工作条件(最先或最后几步)。有1~5名卷板工,工作1 h~80 h,外照射是假定10 t全圆柱形卷材,长122 cm,半径58 cm,距离1.5 m。

除以上各步外,还考虑由污染钢或钢渣制成的消费品可能带来的照射。包括钢渣在沥青中的使用(假定用于建造停车场),用钢板建房、制造汽车和设备,以及炒锅和大型设备的使用等。均假定100 t钢(或10 t钢渣)用于制造一种产品,受照人数和时间见表A.1。

j) 钢渣利用:

假定钢渣混于沥青,用于铺建停车场路面。停车场看守人每年工作2 000 h,40 a。外照为圆盘形源,厚10 cm,半径564 m,距离1 m。

k) 构筑物使用:

假定最大受照个人在由钢板构成墙壁的房内,每年1 500 h,壁厚0.2 cm,内表面积60 m²,密度7.86 g/cm³,可估算出每间房使用钢板940 kg。100 t钢可构成110间房,每间房的墙壁由20块钢板组成。房屋四壁假定相当于4块半圆形的钢板,每块钢板的半径为308 cm,厚0.2 cm,人距墙壁3 m。

l) 设备使用:

假定再循环钢被用于制造设备,如炊事炉、洗碗机或者洗衣设备。每件约需钢24 kg,使用人每人受照时间为1 000 h/a。外照模型是1个小的半圆柱源,厚0.1 cm,半径69 cm,距离2 m。

m) 汽车使用:

用于车身,假定为3个薄的圆柱体源,半径1.5 m,厚0.1 cm,总钢167 kg,100 t再循环钢可制造600辆汽车。最大个人剂量是假定每年2 000 h(如出租车司机),对外照射模拟为3个全圆柱体,厚0.1 cm,半径150 cm,距离50 cm。

n) 炒锅使用:

家庭使用,考虑其外照射和食入腐蚀钢,模拟为1个圆柱盘源,半径15 cm,厚0.5 cm,每个炒锅含钢3 kg,距离60 cm。假定锅是由小型炼钢炉炼制的,总共使用10 t钢,共生产3 300个炒锅,照射时间对最大受照个人是180 h/a(约30 min/d)。食入剂量是根据腐蚀率为0.13 mm/a的假定推算的。

o) 大型设备使用:

假定制造大型设备,如金属车床,重0.5 t,100 t钢能生产200台。工人可以在其附近或直接操作。假定靠近工作2 000 h/a,外照射条件是假定10 t重,201 cm长,1 cm厚的圆柱体的一半长度,距离1 m。对这些分析,假定再循环钢中可挥发物可通过烟囱释放,每年处理100 t钢,设施寿命20 a,下风向照射包括吸入、地表外照、污染食物食入。

A.1.2.2 工人受照射剂量估算

A.1.2.2.1 外照射剂量估算公式

核素*i*所致的外照射有效剂量按式(A.1)估算:

$$H_{ext,i,s} = t \cdot C_{w,i} \cdot DF_{ext,i,s} \cdot W \quad \dots\dots\dots(A.1)$$

式中:

$H_{ext,i,s}$ ——表A.1所示相应外照射类别*s*中放射性核素*i*所致年外照射有效剂量,单位为希每年(Sv/a);

t ——个人受照时间,单位为小时每年(h/a),见表A.1;

$C_{w,i}$ ——拟解控回收利用物料中放射性核素*i*的初始浓度,单位为贝可每克(Bq/g),假定为1 Bq/g;

W ——经工人操作的被解控材料的数量与他们所操作的材料总量的比值,取1.0;

$DF_{ext,i,s}$ ——外照射类别*s*,核素*i*的有效剂量转换因子[(Sv/h)/(Bq/g)],见表A.3。

在钢铁回收利用的外照射剂量计算中,其外照射剂量转换因子必须按照回收利用的情况把材料模拟为圆柱体、半圆柱体、圆盘源和线源等4种几何条件。图A.1为圆柱体和半圆柱体源的示意图。

对于不同的回收情景,有不同的照射类别,其参数如表A.1所示,不同的外照射类别所对应的源的几何及有关参数如表A.2所示,外照射剂量转换因子参看表A.3。

A.1.2.2.2 吸入内照射剂量估算方法

回收利用情景中因吸入核素*i*的气溶胶所致待积有效剂量的计算见式(A.2):

$$H_{inh,i} = \xi \cdot t \cdot DF_{inh,i} \cdot W \cdot (C_d \cdot C_{w,i} + C_{s,i} \cdot RF \cdot TF_{inh,i}) \quad \dots\dots\dots(A.2)$$

式中:

$H_{inh,i}$ ——一年内吸入核素*i*所产生的待积有效剂量,单位为希每年(Sv/a);

ξ ——呼吸速率,单位为立方米每小时(m³/h),取1.2 m³/h;

t ——个人受照时间,单位为小时每年(h/a),见表A.1;

W ——经工人操作的被解控材料量与他们所操作的材料总量的比值,取1.0;

$DF_{inh,i}$ ——吸入1 Bq核素*i*后的待积有效剂量,单位为希每贝可(Sv/Bq),见表A.4;

C_d ——空气中可吸入尘埃浓度,单位为克每立方米(g/m³),见表A.1;

$C_{w,i}$ ——待回炉的解控材料中核素*i*未经稀释时的初始放射性活度浓度,单位为贝可每克(Bq/g),取1.0;

$C_{s,i}$ ——表面污染浓度,单位为贝可每平方厘米(Bq/cm²),取1.0;

RF ——表面活度再悬浮因子(m⁻¹),取10⁻⁶;

$TF_{inh,i}$ ——表面活度的吸入转移因子(m⁻¹),取10⁻²。

A.1.2.2.3 食入内照射个人剂量估算的方法

回收利用情景中因食入核素*i*所致待积有效剂量的估算见式(A.3):

$$H_{ing,i} = t \cdot DF_{ing,i} \cdot W \cdot (I_1 \cdot C_{ing,i} + I_2 \cdot TF_{ing,i} \cdot C_{s,i}) \quad \dots\dots\dots(A.3)$$

式中:

$H_{ing,i}$ ——一年内食入核素 i 后的待积有效剂量,单位为希每年(Sv/a);

t ——个人受照时间,单位为小时每年(h/a),见表 A.1;

W ——解控材料的数量与回收材料总量的比值,取 1.0;

$DF_{ing,i}$ ——食入 1 Bq 核素 i 后的待积有效剂量,单位为希每贝可(Sv/Bq),见表 A.4;

I_1 ——沉降灰造成的可转移表面污染的二次食入速率,单位为克每小时(g/h),取 0.01;

$C_{ing,i}$ ——可食入尘埃中的放射性活度浓度,单位为贝可每克(Bq/g),取 1.0;

I_2 ——可转移的表面污染二次食入速率,单位为平方米每小时(m^2/h),取 10^{-4} ;

$TF_{ing,i}$ ——表面活度的食入转移因子,取 0.01;

$C_{s,i}$ ——表面污染活度浓度,单位为贝可每平方米(Bq/cm^2),取 1.0。

表 A.1 用于估算钢铁再循环、再利用中的照射情景和个人剂量相关参数
(IAEA Safety Series No. 111-P-1.1)

再循环步骤	考虑情景	外照射类别 s^a	内照射途径	个人受照时间/h	空气中可吸入尘埃浓度/ (g/m^3)
废钢铁运输	1.1 装卸工 1	I	吸入	4	0.005
	1.2 卡车司机	II	— ^a	4	—
废钢铁处理	2.1 处理(切割机、调形)工	III	吸入和食入	12	0.000 1
熔炼	3.1 熔炉堆料场工人 1	IV	吸入	80	0.000 1
	3.2 熔炉装料工 1 ^b	V	吸入和食入	4	0.001
	3.2 熔炉装料工 2	V [*]	吸入和食入	20	0.001
	3.3 熔炉操作工 1 ^c	VI	吸入和食入	5	0.001
	3.3 熔炉操作工 2	VII	吸入和食入	50	0.001
工业产品或副产品	4.1 大钢锭铸工 1 ^d	VIII	吸入和食入	2.5	0.001
	4.1 大钢锭铸工 2	VIII [*]	吸入和食入	25	0.001
	4.2 小件铸工 3	IX	吸入和食入	50	0.001
	4.3 熔渣收集工	X	吸入和食入	25	0.001
	4.4 卡车装卸工 2	XI	—	2	—
初步制备	4.5 卡车司机 2	XII	—	5	—
	5.1 制备厂堆料场地工人 2	XIII	—	40	—
	5.2 制备厂薄板工	XIV	吸入和食入	1	—
最终制造	5.3 打卷工	XV	吸入和食入	1	0.001
	6.1 薄板工	XIV	—	1	—
销售	6.2 打卷工	XV	—	80	—
	7.1 卡车装卸工 2	XI	—	20	—
	7.2 卡车司机 2	XII	—	8	—
	7.3 建筑、组装工	XIV	—	20	—
	7.4 仓库工人 3	XVI	—	2 000	—

表 A.1 (续)

再循环步骤	考虑情景	外照射类别 ^a	内照射途径	个人受照时间/h	空气中可吸入尘埃浓度/(g/m ³)
消费者使用	8.1 停车场	XVI	—	2 000	—
	8.2 房间	XVII	—	1 500	—
	8.3 器具	XIX	—	1 000	—
	8.4 汽车	XX	—	2 000	—
	8.5 炒锅	XXI	食入	180	—
	8.6 大设备	XXV	—	2 000	—
尾气排放	9.1 下风向个人	f	吸人和食入	2 000	g

^a 外照射类别表示用于计算外照射有效剂量转换因子时的特定几何条件、源半径、厚度及密度如表 A.2 所示。
^b 2 种装料工表示“装料 1”指对 100 t 炉的熔炼厂，“装料工 2”指对 10 t 炉的熔炼厂。
^c 2 种熔炉操作工表示：“操作工 1”指对 100 t 炉的熔炼厂，“操作工 2”指对 10 t 炉的熔炼厂。
^d 3 种铸工表示：“铸工 1”指对 100 t 炉的熔炼厂，“铸工 2”指对 10 t 炉的熔炼厂，两种均指钢锭铸工，“铸工 3”指对小物件的铸工。
^e “—”表示不考虑该途径。
^f 浸没和地表外照。
^g 假定扩散因子平均等于 $5 \times 10^{-7} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$ ，再计算出平均污染浓度(Bq/m³)。大量研究表明，下风向个人剂量可以忽略。因此不再计算。

表 A.2 钢铁再循环和工具及设备再利用中的外照射类别的辐照源描述

外照射类别 ^s	源的描述	源的形状	密度/(g/cm ³)	长度 L/cm	半径 R/cm	距离 D/cm
I	25 t 废钢铁堆	1 半圆柱体	3.93	253	127	400
II	20 t 卡车货物	1 半圆柱体	3.93	900	60	200
III	0.5 t 废钢铁货物	1 半圆柱体	5.90	60	30	200
IV	100 t 废钢铁堆	1 半圆柱体	5.90	351	175	1 000
V	50 t 废钢铁堆	1 半圆柱体	5.90	279	139	400
VI ^a	100 t 炼钢炉	1 全圆柱体	7.86	253	127	300
VII ^a	10 t 炼钢炉	1 全圆柱体	7.86	117	59	300
VIII	10 t 钢锭	1 全圆柱体	7.86	100	64	150
IX	1 t 铸件	1 全圆柱体	7.86	1	201	100
X ^b	100 t 炉渣堆	1 半圆柱体	2.70	455	228	1 500
XI	5×10 t 铸锭	1 半圆柱体	7.86	100	201	400
XII	2×10 t 铸锭	1 全圆柱体	7.86	200	64	200
XIII	5×10 t 铸锭	1 半圆柱体	7.86	100	201	1 000
XIV	47 kg 钢板	1 半圆柱体	7.86	0.2	138	100
XV	10 t 钢卷	1 全圆柱体	7.86	122	58	150

表 A.2 (续)

外照射类别 <i>s</i>	源的描述	源的形状	密度/ (g/cm ³)	长度 <i>L</i> / cm	半径 <i>R</i> / cm	距离 <i>D</i> / cm
XVI	6 块钢板	1 半圆柱体	7.86	1.2	138	600
XVII ^c	沥青, 炉渣, 停车场	1 全圆柱体	2.70	10	5 642	100
XVIII	20 块钢板	4 半圆面	7.86	0.2	308	300
XIX	1 小块控制板	1 半圆柱体	7.86	0.1	69	200
XX	3 块钢板(汽车)	3 全圆柱体	7.86	0.1	150	50
XXI	1 个炒锅	1 全圆柱体	7.86	0.5	15	60
XXII ^d	小物件	1 半圆盘	—	—	14	60
	小物件	1 半圆盘	—	—	14	68
XXIII ^e	小物件	有屏蔽线源	—	20	—	60
XXIV ^f	大设备	2 圆盘	—	—	25	100
XXV ^g	大设备	1 全圆柱体	—	—	—	—

a 假定有 2.5 cm 炉壁(铁)及 30.5 cm 厚的耐火砖衬(铝)的屏蔽。
b 假定由于污染与不污染炉渣的混合后渣中活度浓度为 1 Bq/g。
c 假定与其他沥青相混稀释后的活度浓度为 0.037 Bq/g。
d 假定四个圆盘表面中的每一个表面活度为 1 Bq/cm²。
e 假定活度为 63 Bq/cm 以及在 0.5 cm 厚铝箱内。
f 假定个圆盘两个表面活度均为 1 Bq/cm²。
g 大铸件, 一个体积源, 剂量率按外照射Ⅱ类值的一半计算。

表 A.3 污染钢铁再循环、再利用情景下不同外照射类别和不同核素的有效剂量转换因子(Sv/h)/(Bq/g)(IAEA Safety Series No. 111-P-1.1)

外照射类别 <i>s</i>	核 素				
	⁵⁴ Mn	⁵⁵ Fe	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	⁶⁵ Zn
I	4.2×10 ⁻⁹	9.4×10 ⁻¹⁶	1.4×10 ⁻⁸	—	2.7×10 ⁻⁹
II	3.6×10 ⁻⁹	2.7×10 ⁻¹⁵	1.2×10 ⁻⁸	—	2.3×10 ⁻⁹
III	9.7×10 ⁻¹⁰	7.1×10 ⁻¹⁶	3.2×10 ⁻⁹	—	6.3×10 ⁻¹⁰
IV	1.4×10 ⁻⁹	1.1×10 ⁻¹⁷	4.6×10 ⁻⁹	—	8.9×10 ⁻¹⁰
V	5.1×10 ⁻⁹	1.1×10 ⁻¹⁵	1.7×10 ⁻⁸	—	3.3×10 ⁻⁹
VI	7.5×10 ⁻¹⁰	—	3.2×10 ⁻⁹	—	5.4×10 ⁻¹⁰
VII	1.9×10 ⁻¹⁰	—	8.2×10 ⁻¹⁰	—	1.4×10 ⁻¹⁰
VIII	1.4×10 ⁻⁸	1.3×10 ⁻¹⁴	4.7×10 ⁻⁸	—	9.2×10 ⁻⁹
IX	2.8×10 ⁻⁸	9.9×10 ⁻¹⁴	8.8×10 ⁻⁸	—	1.8×10 ⁻⁸
X	1.0×10 ⁻⁹	3.2×10 ⁻¹⁸	3.3×10 ⁻⁹	—	6.5×10 ⁻¹⁰
XI	9.8×10 ⁻⁹	2.0×10 ⁻¹⁵	3.3×10 ⁻⁸	—	6.4×10 ⁻⁹
XII	8.5×10 ⁻⁹	5.9×10 ⁻¹⁵	2.8×10 ⁻⁸	—	5.5×10 ⁻⁹

表 A.3 (续)

外照射类别 <i>s</i>	核 素				
	⁵⁴ Mn	⁵⁵ Fe	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	⁶⁵ Zn
XIII	1.8×10^{-9}	1.4×10^{-17}	6.0×10^{-9}	—	1.2×10^{-9}
XIV	2.1×10^{-9}	4.0×10^{-14}	6.6×10^{-9}	—	1.4×10^{-9}
XV	1.2×10^{-8}	1.1×10^{-14}	3.9×10^{-8}	—	7.7×10^{-9}
XVI	5.5×10^{-10}	1.7×10^{-16}	1.7×10^{-9}	—	3.5×10^{-10}
XVII	2.0×10^{-9}	1.1×10^{-14}	6.3×10^{-9}	—	1.3×10^{-9}
XVIII	5.8×10^{-9}	3.3×10^{-14}	1.8×10^{-8}	—	3.6×10^{-9}
XIX	1.1×10^{-10}	3.4×10^{-15}	3.5×10^{-10}	—	7.2×10^{-11}
XX	1.4×10^{-8}	5.1×10^{-13}	4.3×10^{-8}	—	8.8×10^{-9}
XXI	5.9×10^{-10}	8.6×10^{-15}	1.8×10^{-9}	—	3.7×10^{-10}
XXII ^a	2.5×10^{-10}	1.3×10^{-12}	7.5×10^{-10}	—	1.6×10^{-10}
XXIII ^a	2.7×10^{-10}	1.9×10^{-12}	8.3×10^{-10}	—	1.7×10^{-10}
XXIV ^a	3.2×10^{-10}	2.3×10^{-12}	9.8×10^{-10}	—	2.0×10^{-10}
外照射类别 <i>s</i>	核 素				
	⁹⁰ Sr	⁹⁴ Nb	⁹⁹ Tc	¹³⁷ Cs	¹⁵² Eu
I	—	8.4×10^{-9}	—	3.1×10^{-9}	3.6×10^{-9}
II	—	7.2×10^{-9}	—	2.6×10^{-9}	3.1×10^{-9}
III	—	2.0×10^{-9}	—	7.1×10^{-10}	8.3×10^{-10}
IV	—	2.7×10^{-9}	—	1.0×10^{-9}	1.2×10^{-9}
V	—	1.0×10^{-8}	—	3.7×10^{-9}	4.3×10^{-9}
VI	—	1.5×10^{-9}	—	5.3×10^{-10}	7.6×10^{-10}
VII	—	3.9×10^{-10}	—	1.4×10^{-10}	1.9×10^{-10}
VIII	—	2.8×10^{-8}	—	1.0×10^{-8}	1.2×10^{-8}
IX	—	5.7×10^{-8}	—	2.1×10^{-8}	2.3×10^{-8}
X	—	2.0×10^{-9}	—	7.4×10^{-10}	8.7×10^{-10}
XI	—	2.0×10^{-8}	—	7.2×10^{-9}	8.4×10^{-9}
XII	—	1.7×10^{-8}	—	6.2×10^{-9}	7.2×10^{-9}
XIII	—	3.6×10^{-9}	—	1.3×10^{-9}	1.5×10^{-9}
XIV	—	4.3×10^{-9}	—	1.6×10^{-9}	1.8×10^{-9}
XV	—	2.4×10^{-8}	—	8.6×10^{-9}	1.0×10^{-8}
XVI	—	1.1×10^{-9}	—	4.1×10^{-10}	4.6×10^{-10}
XVII	—	3.9×10^{-9}	—	1.5×10^{-9}	1.7×10^{-9}
XVIII	—	1.1×10^{-8}	—	4.3×10^{-9}	4.8×10^{-9}
XIX	—	2.3×10^{-10}	—	8.5×10^{-11}	9.6×10^{-11}
XX	—	2.8×10^{-8}	—	1.1×10^{-8}	1.2×10^{-8}
XXI	—	1.2×10^{-9}	—	4.4×10^{-10}	4.9×10^{-10}
XXII ^a	—	4.9×10^{-10}	—	1.8×10^{-10}	2.1×10^{-10}
XXIII ^a	—	5.4×10^{-10}	—	2.0×10^{-10}	2.3×10^{-10}
XXIV ^a	—	6.4×10^{-10}	—	2.4×10^{-10}	2.8×10^{-10}

表 A.3 (续)

外照射类别 <i>s</i>	核 素			
	²³⁸ U	²³⁹ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴¹ Am
I	6.1×10 ⁻¹¹	3.0×10 ⁻¹⁴	—	2.9×10 ⁻¹²
II	5.3×10 ⁻¹¹	2.7×10 ⁻¹⁴	—	2.6×10 ⁻¹²
III	1.4×10 ⁻¹¹	7.2×10 ⁻¹⁵	—	6.8×10 ⁻¹³
IV	2.0×10 ⁻¹¹	9.0×10 ⁻¹⁵	—	9.0×10 ⁻¹³
V	7.4×10 ⁻¹¹	3.5×10 ⁻¹⁴	—	3.4×10 ⁻¹²
VI	1.1×10 ⁻¹¹	3.4×10 ⁻¹⁷	—	1.4×10 ⁻²²
VII	2.9×10 ⁻¹²	9.9×10 ⁻¹⁸	—	5.6×10 ⁻²³
VIII	2.1×10 ⁻¹⁰	1.0×10 ⁻¹³	—	9.8×10 ⁻¹²
IX	4.5×10 ⁻¹⁰	6.8×10 ⁻¹³	—	6.9×10 ⁻¹¹
X	1.8×10 ⁻¹¹	3.8×10 ⁻¹⁴	—	5.9×10 ⁻¹²
XI	1.4×10 ⁻¹⁰	6.8×10 ⁻¹⁴	—	6.5×10 ⁻¹²
XII	1.2×10 ⁻¹⁰	6.2×10 ⁻¹⁴	—	5.8×10 ⁻¹²
XIII	2.6×10 ⁻¹¹	1.2×10 ⁻¹⁴	—	1.2×10 ⁻¹²
XIV	4.1×10 ⁻¹¹	1.2×10 ⁻¹³	—	2.2×10 ⁻¹¹
XV	1.7×10 ⁻¹⁰	8.8×10 ⁻¹⁴	—	8.2×10 ⁻¹²
XVI	8.9×10 ⁻¹²	1.4×10 ⁻¹⁴	—	1.6×10 ⁻¹²
XVII	3.6×10 ⁻¹¹	9.0×10 ⁻¹⁴	—	1.5×10 ⁻¹¹
XVIII	1.1×10 ⁻¹⁰	3.0×10 ⁻¹³	—	6.2×10 ⁻¹¹
XIX	2.3×10 ⁻¹²	8.8×10 ⁻¹⁵	—	1.9×10 ⁻¹²
XX	2.8×10 ⁻¹⁰	9.4×10 ⁻¹³	—	1.8×10 ⁻¹⁰
XXI	1.1×10 ⁻¹¹	2.6×10 ⁻¹⁴	—	3.8×10 ⁻¹²
XXII ^a	6.3×10 ⁻¹²	2.5×10 ⁻¹³	—	6.9×10 ⁻¹²
XXIII ^a	5.7×10 ⁻¹²	1.3×10 ⁻¹⁴	—	5.0×10 ⁻¹²
XXIV ^a	9.1×10 ⁻¹²	5.3×10 ⁻¹³	—	1.1×10 ⁻¹¹

^a 假定有 2.5 cm 炉壁(铁)及 30.5 cm 厚的耐火砖衬(铝)的屏蔽。

表 A.4 污染钢铁再循环、再利用情景下不同核素的内照射待积有效剂量转换因子
(取自 GB 18871—2002)

核 素	<i>DF_{inh}</i>	<i>DF_{ing}</i>
⁵⁴ Mn	1.5×10 ⁻⁹	7.1×10 ⁻¹⁰
⁵⁵ Fe	7.7×10 ⁻¹⁰	3.3×10 ⁻¹⁰
⁶⁰ Co	3.1×10 ⁻⁸	3.4×10 ⁻⁹
⁶³ Ni	1.3×10 ⁻⁹	1.5×10 ⁻¹⁰
⁶⁵ Zn	2.2×10 ⁻⁹	3.9×10 ⁻⁹
⁹⁰ Sr	1.6×10 ⁻⁷	2.8×10 ⁻⁸

表 A.4 (续)

核 素	DF_{inh}	DF_{ing}
^{94}Nb	4.9×10^{-8}	1.7×10^{-9}
^{99}Tc	1.3×10^{-8}	6.4×10^{-10}
^{137}Cs	3.9×10^{-8}	1.3×10^{-8}
^{152}Eu	4.2×10^{-8}	1.4×10^{-9}
^{239}Pu	1.2×10^{-4}	2.5×10^{-7}
^{241}Pu	2.3×10^{-5}	4.8×10^{-9}
^{241}Am	9.6×10^{-5}	2.0×10^{-7}
^{238}U	8.0×10^{-6}	4.5×10^{-8}

A.2 铝的再循环、再利用

一般情况下,反应堆部件中铝的表面因与冷却剂接触而被污染。所以,其污染放射性核素与钢铁再利用的情况类似,选择了 ^{55}Fe 、 ^{54}Mn 等14种核素,并假定在冶炼过程中被污染的铝均匀地分布于熔炼材料中,浓度为1 Bq/g。

对于铝的再利用过程中的各个情景也与钢铁再利用的情景类似。关于铝的熔炼过程的照射情景主要有“装卸工、卡车司机、处理工”等9种情形;关于用铝材所制造的消费品主要有建材、发动机部件等。有关各情景所涉及的受照人数、时间、途径等参数均在表 A.5 中列出。

表 A.5 用于估算铝再循环、再利用中的照射情景和个人剂量的相关参数
(IAEA Safety Series No. 111-P-1.1)

考虑情景	外照射类别 s	内照射途径	个人受照时间/h	空气中尘埃浓度/(g/m ³)
1.1 装卸工	I	吸入	4	0.000 5
1.2 卡车司机	II	—	4	—
2.1 处理工	III	吸入和食入	12	0.000 1
3.1 熔料堆料厂工人	IV	吸入	80	0.000 1
3.2 熔炉操作工	V	吸入和食入	50	0.001
4.1 铸工	VI	吸入和食入	25	0.001
4.2 熔渣收集工	VII	吸入和食入	48	0.001
5.1 薄板工	VIII	吸入和食入	1	0.000 1
5.2 仓库工人	IX	—	80	—
6.1 建材	X	—	1 500	—
6.2 汽车	X	—	2 000	—
6.3 炒锅	XI	食入	180	—

由于铝的密度小于钢铁的密度,相同质量的铝制造的产品的数量比钢铁的多约3倍。因此假定100 t的铝用来制造建材和汽车,10 t的铝用来制造炒锅等。

剂量的估算方法类同于钢铁再循环的情景,在 A.1.2.2 中已经作了详细描述。

对于铝循环中外照射情景,在表 A.6 中列出了各个情景的源项类别,表 A.7 列出了不同核素的外照射剂量转换因子。

表 A.6 铝再循环中外照射类别的辐照源项描述
(IAEA Safely Series No. 111-P-1. 1)

外照射类别 <i>s</i>	源的描述	源的形状	密度/ (g/cm ³)	长度/ cm	半径 <i>R</i> / cm	距离 <i>D</i> / cm
I	10 t 废料堆	1 半圆柱体	1.35	266	133	400
II	10 t 卡车货物	1 半圆柱体	1.35	900	72	200
III	5 t 废料捆	1 半圆柱体	1.80	192	96	200
IV	50 t 废料堆	1 半圆柱体	2.70	414	207	1 000
V	25 t 装料炉	1 全圆柱体	2.70	228	114	300
VI	0.5 t 铸件	1 全圆柱体	2.70	1	243	100
VII	25 t 废料堆	1 半圆柱体	2.70	143	287	1 000
VIII	16 kg 铝板	1 半圆柱体	2.70	0.2	138	100
IX	20 片铝板	4 半圆柱体	2.70	0.2	308	300
X	3 个薄片	3 全圆柱体	2.70	0.1	150	50
XI	一个炒锅	1 全圆柱体	2.70	1	15	60
XII	引擎	1 半圆柱体	2.70	24	24	150

表 A.7 污染铝再循环、再利用情景中各外照射类别的不同核素有效剂量转换因子(Sv/h)/(Bq/g)
(IAEA Safely Series No. 111-P-1. 1)

外照射类别 <i>s</i>	核 素				
	⁵⁴ Mn	⁵⁵ Fe	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	⁶⁵ Zn
I	4.1×10 ⁻⁹	6.8×10 ⁻¹⁵	1.3×10 ⁻⁸	—	2.6×10 ⁻⁹
II	4.3×10 ⁻⁹	2.5×10 ⁻¹⁴	1.4×10 ⁻⁸	—	2.8×10 ⁻⁹
III	7.6×10 ⁻⁹	4.0×10 ⁻¹⁴	2.5×10 ⁻⁸	—	4.9×10 ⁻⁹
IV	1.8×10 ⁻⁹	9.5×10 ⁻¹⁷	6.0×10 ⁻⁹	—	1.2×10 ⁻⁹
V	5.9×10 ⁻¹⁰	0.0	2.5×10 ⁻⁹	—	4.2×10 ⁻¹⁰
VI	1.3×10 ⁻⁸	7.0×10 ⁻¹³	3.9×10 ⁻⁸	—	8.1×10 ⁻⁹
VII	8.9×10 ⁻¹⁰	4.8×10 ⁻¹⁷	3.0×10 ⁻⁹	—	5.8×10 ⁻¹⁰
VIII	7.5×10 ⁻¹⁰	2.7×10 ⁻¹³	2.3×10 ⁻⁹	—	4.7×10 ⁻¹⁰
IX	2.0×10 ⁻⁹	2.2×10 ⁻¹³	6.2×10 ⁻⁹	—	1.3×10 ⁻⁹
X	4.9×10 ⁻⁹	3.4×10 ⁻¹²	1.5×10 ⁻⁸	—	3.1×10 ⁻⁹
XI	4.1×10 ⁻¹⁰	5.7×10 ⁻¹⁴	1.3×10 ⁻⁹	—	2.6×10 ⁻¹⁰
XII	1.4×10 ⁻⁹	1.1×10 ⁻¹⁴	4.5×10 ⁻⁹	—	9.0×10 ⁻¹⁰
外照射类别 <i>s</i>	核 素				
	⁹⁰ Sr	⁹⁴ Nb	⁹⁹ Tc	¹³⁷ Cs	¹⁵² Eu
I	—	8.2×10 ⁻⁹	—	3.0×10 ⁻⁹	3.6×10 ⁻⁹
II	—	8.7×10 ⁻⁹	—	3.2×10 ⁻⁹	3.7×10 ⁻⁹
III	—	1.5×10 ⁻⁸	—	5.6×10 ⁻⁹	6.6×10 ⁻⁹
IV	—	3.6×10 ⁻⁹	—	1.3×10 ⁻⁹	1.6×10 ⁻⁹

表 A.7 (续)

外照射类别 <i>s</i>	核 素				
	⁹⁰ Sr	⁹⁴ Nb	⁹⁹ Tc	¹³⁷ Cs	¹⁵² Eu
V	—	1.2×10^{-9}	—	4.2×10^{-10}	5.9×10^{-10}
VI	—	2.6×10^{-8}	—	9.6×10^{-9}	1.1×10^{-8}
VII	—	1.8×10^{-9}	—	6.6×10^{-10}	7.8×10^{-10}
VIII	—	1.5×10^{-9}	—	5.6×10^{-10}	6.4×10^{-10}
IX	—	4.0×10^{-9}	—	1.5×10^{-9}	1.7×10^{-9}
X	—	9.7×10^{-9}	—	3.7×10^{-9}	4.2×10^{-9}
XI	—	8.2×10^{-10}	—	3.1×10^{-10}	3.5×10^{-10}
XII	—	2.8×10^{-9}	—	1.0×10^{-9}	1.2×10^{-9}
外照射类别 <i>s</i>	核 素				
	²³⁸ U	²³⁹ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴¹ Am	
I	7.5×10^{-11}	1.7×10^{-13}	—	2.7×10^{-11}	
II	7.9×10^{-11}	2.0×10^{-13}	—	3.0×10^{-11}	
III	1.4×10^{-10}	3.4×10^{-13}	—	5.1×10^{-11}	
IV	3.3×10^{-11}	7.0×10^{-14}	—	1.1×10^{-11}	
V	8.8×10^{-12}	1.6×10^{-13}	—	1.0×10^{-12}	
VI	2.7×10^{-10}	1.3×10^{-12}	—	2.6×10^{-10}	
VII	1.6×10^{-11}	3.4×10^{-14}	—	5.3×10^{-12}	
VIII	1.7×10^{-11}	2.6×10^{-13}	—	1.9×10^{-11}	
IX	4.6×10^{-11}	5.6×10^{-13}	—	5.0×10^{-11}	
X	1.2×10^{-10}	2.5×10^{-12}	—	1.3×10^{-10}	
XI	8.9×10^{-12}	5.7×10^{-14}	—	8.9×10^{-12}	
XII	2.6×10^{-11}	6.7×10^{-14}	—	1.0×10^{-11}	

A.3 镍的再循环、再利用

镍的回收再循环、再利用工艺流程(见表 A.8):

- 镍回收后的最主要用途是冶炼不锈钢,因此回收后的再循环流程与钢铁熔炼炉以后的流程基本相同。不锈钢的镍含量一般不超过 20%,本标准保守地按 20%估计。因此假定在进入熔炼炉之前以镍形态出现,熔炼后按 $C=0.2 \text{ Bq/g}$ 考虑。
- 镍很稳定,不会进入熔炼后生成的炉渣中,因此放射性核素也不会进入炉渣。原钢铁流程中“熔渣收集工受照”情景可不予考虑。
- 由于不锈钢的应用中,不会有“停车场(炉渣修成)”、“汽车”和“房屋”三项,因此在应用中这三项可不予考虑。

表 A.8 污染镍再循环、再利用中的照射情景和个人剂量的相关参数

再循环步骤	考虑情景	外照射类别 ^a	内照射途径	个人受照时间/h	空气中尘埃浓度/(g/m ³)
废镍运输	1.1 装卸工 1	I	吸入	4	0.000 5
	1.2 卡车司机	II	— ^e	4	—
材料处理	2.1 处理(清洗、调形)工	III	吸入和食入	12	0.000 1
熔炼 ^a	3.1 熔炉堆料场工人	IV	吸入	80	0.000 1
	3.2 熔炉装料工 1 ^d	V	吸入和食入	4	0.001
	3.2 熔炉装料工 2	V ^e	吸入和食入	20	0.001
	3.3 熔炉操作工 1 ^e	VI	吸入和食入	5	0.001
	3.3 熔炉操作工 2	VII	吸入和食入	50	0.001
工业产品或副产品 ^b	4.1 大钢锭铸工 1 ^f	VIII	吸入和食入	2.5	0.001
	4.1 大钢锭铸工 2	VIII ^e	吸入和食入	25	0.001
	4.2 小件铸工 3	IX	吸入和食入	50	0.001
	4.3 卡车装卸工 2	XI	—	2	—
	4.4 卡车司机 2	XII	—	5	—
初步制备	5.1 堆料场工人 2	XIII	—	40	—
	5.2 制备厂薄板工	XIV	吸入和食入	1	0.000 1
	5.3 打卷工	XV	吸入和食入	1	0.000 1
最终制造	6.1 薄板工	XIV	—	1	—
	6.2 打卷工	XV	—	80	—
销售	7.1 卡车装卸工 2	XI	—	20	—
	7.2 卡车司机 2	XII	—	8	—
	7.3 仓库工人 3	XVI	—	2 000	—
消费者使用	8.1 器具	XIX	—	1 000	—
	8.2 炒锅	XXI	食入	180	—
	8.3 大设备	XXV	—	2 000	—
尾气排放	9.1 下风向个人	^h	吸入,食入	2 000	ⁱ

^a 从本步骤开始假定不锈钢中含镍 20%, 即 C=0.2 Bq/g.

^b 镍不进入熔渣.

^c 外照射类别表示用于计算外照射时的特定几何和源的条件, 见表 A.2 所示.

^d 2 种装料工“装料工 1”表示对 100 t 炉的熔炼厂, “装料工 2”表示对 10 t 炉的熔炼厂.

^e 2 种熔炉操作工, “操作工 1”表示对 100 t 炉的熔炼厂, “操作工 2”表示对 10 t 炉的熔炼厂.

^f 3 种铸工, “铸工 1”指 100 t 炉的熔炼厂, “铸工 2”指 10 t 炉的熔炼厂的钢锭铸工, “铸工 3”指对小物件的铸工.

^g “—”表示不考虑该途径.

^h 表示考虑烟羽浸没和地表外照射.

ⁱ 假定扩散因子为 $5 \times 10^{-7} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$, 可计算出空气浓度, 但大量计算表明下风向个人剂量可忽略, 因此不再计算.

A.4 铜的再循环、再利用

A.4.1 铜的回收再循环、再利用工艺流程(见表 A.9)

- a) 作为回收铜(纯铜),直接进入阳极炉再电解;
- b) 铜渣不会被排放,而是回收再炼,因此没有“熔渣收集工”受照情景;
- c) 铜产品的应用中,主要只考虑“电缆、电线”一项;
- d) 由于铜的密度与钢铁相差不大。因此除了“电缆、电线”应用一步由于源的形状与 IAEA 推导的圆柱体相差较大,剂量转换因子是专门推导的,其余各步外照射剂量转换因子,均采用 IAEA 111-P-1.1 为钢铁推荐的外照射剂量转换因子。

表 A.9 用于估算铜再循环、再利用中的照射情景和个人剂量相关参数(本标准推荐)

再循环步骤	考虑情景	外照射类别 s	内照射途径	个人受照时间/h	空气中尘埃浓度/ (g/m^3)
废铜运输	1.1 装卸工	I	吸入	4	0.000 5
	1.2 货车司机	II	—	4	—
废铜前处理	2.1 处理工	III	吸入和食入	12	0.000 1
阳极炉精炼	3.1 装卸工	IV	吸入	80	0.000 1
	3.2 操作工	VI	吸入和食入	5	0.001
电解精炼	4.2 装槽和运行操作工	IX	吸入和食入	50	0.001
初加工产品	5.1 板材和棒材延压、拉制工	XIII	—	40	—
深加工产品	6.1 电缆、电器件加工	XV ^a	吸入和食入	1	—
销售	7.1 装卸工	XI	—	2	—
	7.2 货车司机	XII	—	5	—
	7.3 仓储工人	XVI	—	2 000	—
消费	8.1 电缆、电线	编制组推导	—	1 500	—

^a 关于“电缆、电线”应用情况下的外照射剂量转换因子的推导见 A.4.2。

A.4.2 关于“电缆、电线”应用情况下的外照射剂量转换因子的推导

“电缆、电线”照射示意图 A.2。

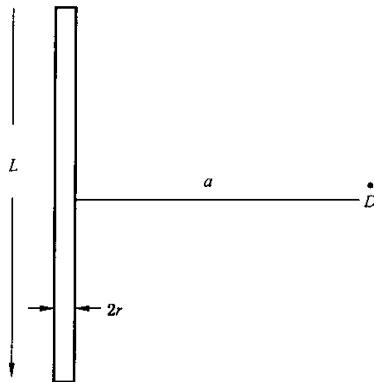


图 A.2 “电缆、电线”照射示意图

对电缆采用“线源”模式,离电缆垂直距离为 a 处的空气中比释动能率(\dot{D})的计算见式(A.4):

$$\dot{D} = \frac{2A\Gamma}{La} \text{tg}^{-1} \left(\frac{L}{2a} \right) \dots\dots\dots(\text{A.4})$$

式中:

\dot{D} ——上述离电缆垂直距离为 a 处的空气中比释动能率;

L ——线源长度,室内假定 $L=10\text{ m}$;

a ——人离线距离,假定 $a=3\text{ m}$;

铜的密度为 $\rho=8.93\text{ g/m}^3$,线中放射性活度 $C=1\text{ Bq/g}$ 。

式中 A 为线源的总活度,计算见式(A.5):

$$A = L \cdot \pi r^2 \times \rho \cdot C = 1000\text{ cm} \times \pi \times (0.15\text{ cm})^2 \times 8.93\text{ g/cm}^3 \times 1\text{ Bq/g}$$

$$= 631.1\text{ Bq} \dots\dots\dots(\text{A.5})$$

Γ ——点源的比释动能率常数,不同核素点源的比释动能率常数见表 A.10。

r ——线源半径,假定 $r=0.15\text{ cm}$ 。

表 A.10 不同核素点源的比释动能率常数

核素	$\Gamma/(\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	核素	$\Gamma/(\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	核素	$\Gamma/(\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
³⁶ Cl	—	⁹⁰ Sr	—	²³⁹ Pu	—
⁴¹ Ca	—	⁹⁴ Nb	5.8×10^{-17}	²⁴¹ Pu	—
⁵⁴ Mn	3.08×10^{-17}	⁹⁵ Tc	—	²⁴¹ Am	4.13×10^{-18}
⁵⁵ Fe	—	¹³⁷ Cs	2.12×10^{-17}		
⁶⁰ Co	8.67×10^{-17}	¹⁵² Eu	3.80×10^{-17}		
⁶³ Ni	—	²³⁸ U	—		
⁶⁵ Zn	2.08×10^{-17}	²²⁶ Ra(²³⁸ U子体)	6.13×10^{-17}		

根据公式(A.4)及相关参数可计算铜缆线的空气吸收剂量,忽略空气吸收剂量与人体吸收剂量的微小差异,可计算出线源对人体产生的剂量(以⁶⁰Co为例):

$$\dot{D} = \frac{2 \times 631.1 \times 8.67 \times 10^{-17}}{10 \times 3} \times \text{tg}^{-1} \left[\frac{10}{2 \times 3} \right]$$

$$= 3.65 \times 10^{-15} \times 1.03$$

$$= 3.76 \times 10^{-15} (\text{Sv/s})$$

假定一年受照时间 $t \approx 4\text{ h/d} \times 365\text{ d/a} = 1500\text{ h/a}$

年剂量为: $\dot{D} = 3.76 \times 10^{-15}\text{ Sv/a} \times 1500\text{ h/a} \times 3600\text{ Sv/h}$

$$= 2.03 \times 10^{-8}\text{ Sv/a}$$

同理,可计算出铜电缆、电线应用中其他核素的外照射剂量,根据算出的剂量可以求得核素别的外照射剂量转换因子,见表 A.11。

表 A.11 铜电缆、电线应用中不同核素的外照射有效剂量转换因子

核素	年剂量转换因子/ $[(\text{Sv/a})/(\text{Bq/g})]$
⁶⁰ Co	2.08×10^{-8}
¹³⁷ Cs	4.96×10^{-9}
¹⁵² Eu	8.87×10^{-9}
⁵⁴ Mn	7.19×10^{-9}

表 A.11 (续)

核 素	年剂量转换因子/[$(\text{Sv/a})/(\text{Bq/g})$]
^{94}Nb	1.35×10^{-8}
^{241}Am	1.00×10^{-9}
^{226}Ra (^{238}U 子体)	1.43×10^{-8}

附录 B
(资料性附录)

**不同废金属再循环、再利用中的限制性步骤、
照射途径、总有效剂量和推导的活度浓度**

B.1 钢铁再循环、再利用中的限制性步骤、照射途径、总有效剂量和推导的活度浓度见表 B.1。

表 B.1

核素	受剂量最大的步骤	该步骤受剂量最大的照射途径	总有效剂量/ (Sv/a)	活度浓度/ (Bq/g)
Mn-54	消费者使用汽车	外照射	2.8×10^{-5}	4×10^{-1}
Fe-55	熔渣收集工	食入内照射	1.1×10^{-9}	1×10^4
Co-60	消费者使用大设备	外照射	8.8×10^{-5}	1×10^{-1}
Ni-63	熔渣收集工	吸入内照射	7.7×10^{-10}	1×10^4
Zn-65	消费者使用大设备	外照射	1.8×10^{-5}	6×10^{-1}
Sr-90	熔渣收集工	食入内照射	1.2×10^{-7}	9×10^1
Nb-94	消费者使用大设备	外照射	5.7×10^{-5}	2×10^{-1}
Tc-99	熔渣收集工	吸入内照射	5.5×10^{-9}	2×10^3
Cs-137	消费者使用汽车	外照射	2.2×10^{-5}	5×10^{-1}
Eu-152	消费者使用汽车	外照射	2.4×10^{-5}	4×10^{-1}
Pu-239	熔渣收集工	吸入内照射	3.7×10^{-5}	3×10^{-1}
Pu-241	熔渣收集工	吸入内照射	7.0×10^{-7}	1×10^1
Am-241	熔渣收集工	吸入内照射	2.9×10^{-5}	3×10^{-1}
U* -238	熔渣收集工	吸入内照射	2.5×10^{-6}	4×10^0

B.2 铝再循环、再利用中的限制性步骤、照射途径、总有效剂量和推导的活度浓度见表 B.2。

表 B.2

核素	受剂量最大的步骤	该步骤受剂量最大的照射途径	总有效剂量/ (Sv/a)	活度浓度/ (Bq/g)
Mn-54	消费者使用汽车	外照射	9.8×10^{-6}	1×10^0
Fe-55	消费者使用汽车	外照射	6.8×10^{-9}	2×10^3
Co-60	消费者使用汽车	外照射	3.0×10^{-5}	3×10^{-1}
Ni-63	消费者使用炊具	食入内照射	2.5×10^{-10}	4×10^4
Zn-65	消费者使用汽车	外照射	6.2×10^{-6}	2×10^0
Sr-90	消费者使用炊具	食入内照射	4.6×10^{-8}	2×10^2
Nb-94	消费者使用汽车	外照射	1.9×10^{-5}	5×10^{-1}
Tc-99	消费者使用炊具	食入内照射	1.1×10^{-9}	9×10^3
Cs-137	消费者使用汽车	外照射	7.4×10^{-6}	1×10^0
Eu-152	消费者使用汽车	外照射	8.4×10^{-6}	1×10^0
Pu-239	熔炉操作工	吸入内照射	7.3×10^{-6}	1×10^0
Pu-241	熔炉操作工	吸入内照射	1.4×10^{-7}	7×10^1
Am-241	熔炉操作工	吸入内照射	5.9×10^{-6}	2×10^0
U* -238	熔炉操作工	吸入内照射	5.0×10^{-7}	2×10^1

B.3 镍再循环、再利用中的限制性步骤、照射途径、总有效剂量和推导的活度浓度见表 B.3。

表 B.3

核素	受剂量最大的步骤	该步骤受剂量最大的照射途径	总有效剂量/ (Sv/a)	活度浓度/ (Bq/g)
Mn-54	消费者使用大设备	外照射	5.6×10^{-6}	2×10^0
Fe-55	消费者使用炒锅	食入内照射	1.2×10^{-10}	8×10^4
Co-60	消费者使用大设备	外照射	1.8×10^{-5}	6×10^{-1}
Ni-63	消费者使用炒锅	食入内照射	5.4×10^{-11}	2×10^5
Zn-65	消费者使用大设备	外照射	3.6×10^{-6}	3×10^0
Sr-90	消费者使用炒锅	食入内照射	1.0×10^{-8}	1×10^3
Nb-94	消费者使用大设备	外照射	1.1×10^{-5}	9×10^{-1}
Tc-99	消费者使用炒锅	食入内照射	2.3×10^{-10}	4×10^4
Cs-137	消费者使用大设备	外照射	4.2×10^{-5}	2×10^0
Eu-152	消费者使用大设备	外照射	4.6×10^{-5}	2×10^0
Pu-239	小件铸工三	吸入内照射	1.5×10^{-6}	7×10^0
Pu-241	熔炉操作工二	吸入内照射	2.8×10^{-8}	4×10^2
Am-241	小件铸工三	吸入内照射	1.2×10^{-6}	9×10^0
U [*] -238	小件铸工三	吸入内照射	1.1×10^{-7}	1×10^2

B.4 铜再循环、再利用中的限制性步骤、照射途径、总有效剂量和推导的活度浓度见表 B.4。

表 B.4

核素	受剂量最大的步骤	该步骤受剂量最大的照射途径	总有效剂量/ (Sv/a)	活度浓度/ (Bq/g)
Mn-54	电解精炼装槽和运行操作工	外照射	1.4×10^{-6}	7×10^0
Fe-55	电解精炼装槽和运行操作工	食入内照射	2.2×10^{-10}	5×10^4
Co-60	电解精炼装槽和运行操作工	外照射	4.4×10^{-10}	2×10^0
Ni-63	电解精炼装槽和运行操作工	吸入内照射	1.5×10^{-10}	7×10^4
Zn-65	电解精炼装槽和运行操作工	外照射	9.0×10^{-7}	1×10^1
Sr-90	电解精炼装槽和运行操作工	食入内照射	2.4×10^{-8}	4×10^2
Nb-94	电解精炼装槽和运行操作工	外照射	2.9×10^{-6}	4×10^0
Tc-99	电解精炼装槽和运行操作工	吸入内照射	1.1×10^{-9}	9×10^3
Cs-137	电解精炼装槽和运行操作工	外照射	1.1×10^{-6}	9×10^0
Eu-152	电解精炼装槽和运行操作工	外照射	1.2×10^{-6}	9×10^0
Pu-239	电解精炼装槽和运行操作工	吸入内照射	7.3×10^{-6}	1×10^0
Pu-241	电解精炼装槽和运行操作工	吸入内照射	1.4×10^{-7}	7×10^1
Am-241	电解精炼装槽和运行操作工	吸入内照射	5.9×10^{-6}	2×10^0
U [*] -238	电解精炼装槽和运行操作工	吸入内照射	5.3×10^{-7}	2×10^1

注：由推导的活度浓度取整后作为清洁解控水平。